

SÉRIE A, N° 2146

N° D'ORDRE :

3017

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Edith COUILLAUD

ASSISTANT A LA FACULTÉ DES SCIENCES D'ALGER

1^{re} THÈSE. — **RECHERCHES SUR L'ÉVOLUTION DES CEMENTS A DIFFÉRENTES
TEMPÉRATURES.**

2^e THÈSE. — **LES LIANTS DE REMPLACEMENT.**

Soutenues le 10 Novembre 1945 devant la Commission d'examen :

MM. GAULT

Président.

VILLEY

Rapporteur.

WYART

CHRÉTIEN

} *Examineurs.*

**INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT
ET DES TRAVAUX PUBLICS
12, RUE BRANCION, PARIS (XV^e)**

—
1946

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen M. J. CABANNES

PROFESSEURS

P. MONTEL.....	T	Théorie des fonctions.	LANQUINE.....	T	Géologie structurale et géologie appliquée.
L. BLARINGHEM...	T	Botanique.	VALIRON.....	T	Calcul différentiel et Calcul intégral.
G. JULIA.....	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	BARRABÉ.....		Géologie structurale et géologie appliquée.
C. MAUGUIN.....	T	Minéralogie.	VAVON.....	T	Analyse et mesures chimiques.
A. MICHEL-LEVY...	T	Pétrographie.	G. DARMOIS.....	T	Mathématiques générales.
A. DENJOY.....	T	Géométrie supérieure.	CHATTON.....	T	Biologie maritime.
L. LUTAUD.....	T	Géographie physique et géologie dynamique.	AUBEL.....		Chimie biologique.
E. DARMOIS.....	T	Enseignement de Physique.	JACQUES BOURCART.		Géographie physique et Géologie dynamique.
A. DEBIERNE.....	T	Électronique et Radio-activité.	Mme JOLIOT-CURIE.		Physique générale et Radioactivité.
M. JAVILLIER.....	T	Chimie biologique.	PLANTEFOL.....	T	Botanique.
ROBERT LEVY.....	T	Physiologie comparée.	CABANNES.....	T	Recherches physiques.
HENRI VILLAT.....	T	Mécanique des fluides et applications.	GRASSE.....	T	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
CH. JACOB.....	T	Géologie.	PRÉVOST.....		Chimie organique.
P. PASCAL.....	T	Chimie générale.	BOULIGAND.....		Mathématiques.
M. FRÉCHET.....	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	CHAUDRON.....		Chimie.
E. ESCLANGON.....	T	Astronomie.	WYART.....		Minéralogie.
Mme RAMART-LUCAS	T	Chimie organique.	TEISSIER.....	T	Zoologie.
H. BÉGHIN.....	T	Mécanique physique et expérimentale.	MANGENOT.....	T	Biologie végétale.
FOCH.....	T	Mécanique expérimentale des fluides.	P. AUGER.....	T	Physique quantique et relativité.
PAUTHENIER.....	T	Électrotechnique générale.	MONNIER.....		Physiologie générale.
DE BROGLIE.....	T	Théories physiques.	PIVETEAU.....		Géologie.
JOB.....	T	Chimie générale.	ROCARD.....		Physique.
PRENANT.....	T	Anatomie et Histologie comparées.	H. CARTAN.....		Calcul différentiel.
VILLEY.....	T	Mécanique appliquée.	SCHAEFFER.....	T	Physiologie des fonctions.
COMBES.....	T	Physiologie végétale.	LAFFITTE.....		Chimie (P. C. B.).
GARNIER.....	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	LERAY.....		Mécanique théorique des fluides.
PÉRÈS.....	T	Mécanique rationnelle.	FAVART.....		Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.
HACKSPILL.....	T	Chimie minérale.	COULOMB.....	T	Physique du globe.
LAUGIER.....	T	Physiologie générale.	Mlle COUSIN.....		Biologie animale (P. C. B.).
TOUSSAINT.....		Technique Aéronautique.	CHRÉTIEN.....		Analyse et mesures chimiques.
M. CURIE.....		Physique (P. C. B.).	DRACH.....		Évolution des êtres organisés.
G. RIBAUD.....	T	Hautes températures.	CHATELET.....	T	Arithmétique et théorie des nombres.
CHAZY.....	T	Mécanique analytique.	EPHRUSSI.....	T	Génétique.
GAULT.....	T	Chimie appliquée.	WURMSER.....	T	Biologie physico-chimique.
CROZE.....	T	Physique théorique et Physique céleste.	KASTLER.....		Physique.
DUPONT.....	T	Théories chimiques.	BAUER.....	T	Chimie-Physique.
A. THOMAS.....		Évolution des êtres organisés.	RIVIERE.....		Géologie (P. C. B.).
SOLEILLET.....		Physique.	GAUTHERET.....		Biologie végétale (P. C. B.).
FORTIER.....		Mécanique des Fluides.	LUCAS.....		Physique.
			MAX MORAND.....		Physique.
			ARNULF.....		Optique appliquée.

Secrétaire..... Ch. MONIER.

FACULTÉ DES SCIENCES

Nom du Candidat : **COUILLAUD.**

Prénoms : **Elsa - Edith.**

Date de la soutenance : **10 Novembre 1945.**

Numéro d'ordre : **3017.**

1

COUILLAUD (Edith). —

Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures. Paris, *Institut Technique du Bâtiment*, 1946, in-4° carré, 36 p., 11 fig., 17 graph., 7 pl.

Thèse Doct. Sc. Phys., Paris, 1945, Série A 2146, N° 3017.

2

COUILLAUD (Edith). —

Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures. Paris, *Institut Technique du Bâtiment*, 1946, in-4° carré, 36 p., 11 fig., 17 graph., 7 pl.

Thèse Doct. Sc. Phys., Paris, 1945, Série A 2146, N° 3017.

3

COUILLAUD (Edith). —

Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures. Paris, *Institut Technique du Bâtiment*, 1946, in-4° carré, 36 p., 11 fig., 17 graph., 7 pl.

Thèse Doct. Sc. Phys., Paris, 1945, Série A 2146, N° 3017.

4

COUILLAUD (Edith). —

Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures. Paris, *Institut Technique du Bâtiment*, 1946, in-4° carré, 36 p., 11 fig., 17 graph., 7 pl.

Thèse Doct. Sc. Phys., Paris, 1945, Série A 2146, N° 3017.

5

COUILLAUD (Edith). —

Recherches sur l'évolution des ciments à différentes températures. Paris, *Institut Technique du Bâtiment*, 1946, in-4° carré, 36 p., 11 fig., 17 graph., 7 pl.

Thèse Doct. Sc. Phys., Paris, 1945, Série A 2146, N° 3017.

SÉRIE A, N° 2146

N° D'ORDRE :

3017

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Edith COUILLAUD

ASSISTANT A LA FACULTÉ DES SCIENCES D'ALGER

1^{re} THÈSE. — **RECHERCHES SUR L'ÉVOLUTION DES CIMENTS A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES.**

2^e THÈSE. — **LES LIANTS DE REMPLACEMENT.**

Soutenues le 10 Novembre 1945 devant la Commission d'examen :

MM. GAULT

Président.

VILLEY

Rapporteur.

WYART

CHRÉTIEN

} *Examineurs.*

INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT
ET DES TRAVAUX PUBLICS
12, RUE BRANCION, PARIS (XV^e)

1946

A MON PÈRE
In Memoriam.

A MON MAITRE
Le Professeur L. VERAÏN



*en témoignage
de ma très profonde reconnaissance.*

RECHERCHES SUR L'ÉVOLUTION DES CIMENTS A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

Par **Mlle Edith COUILLAUD**, Assistant à la Faculté des Sciences d'Alger.

AVANT-PROPOS

La plus grande partie du travail que nous présentons aujourd'hui était terminée lorsque survint la guerre de 1939. Les deux Notes que M. CAQUOT a bien voulu présenter, en notre nom, à l'Académie des Sciences les 21 mars 1938 (5) et 16 août 1939 (6) (1), font connaître les résultats auxquels nous étions déjà arrivée à cette époque.

Le Laboratoire de Physique industrielle de la Faculté des Sciences d'Alger, où ces expériences ont été poursuivies, a été sollicité de fournir « un effort de guerre » et nous avons dû abandonner toute recherche personnelle. L'isolement partiel de l'Algérie en 1940, en créant des problèmes nouveaux à résoudre, nous a laissé peu de loisirs, qui ont de nouveau été totalement supprimés par la réquisition à laquelle nous avons été soumise ainsi que tout le personnel du Laboratoire depuis novembre 1942.

Et ce n'est qu'à la cessation des hostilités que nous avons pu entreprendre la rédaction de ce travail; malheureusement, le manque de revues françaises et étrangères récentes et l'impossibilité où nous nous sommes trouvée de nous rendre à Paris depuis six ans ne nous a pas permis de donner une bibliographie complète de la question.

Par ailleurs, dès le début de nos recherches, nous avons fabriqué des nombres d'éprouvettes que nous pensions être largement suffisants pour répondre à toutes les questions qui pouvaient se poser. Il s'est trouvé que bien des zones, soit comprises dans les limites de nos expériences, soit extérieures à ces limites, nécessiteraient un complément d'information. Malheureusement, dans ce domaine,

en raison de l'importance du facteur temps, dont on n'est pas maître, il est impossible, comme on peut le faire dans d'autres branches d'expérimentation, de combler des lacunes. Il y a là toute une mine de travaux que nous nous proposons de poursuivre dès que les circonstances le permettront. Il est d'un intérêt évident qu'ils puissent se raccorder avec les résultats acquis.

Qu'il nous soit permis, ici, d'exprimer à M. le professeur VÉRAIN notre très sincère reconnaissance pour les conseils et les encouragements qu'il n'a cessé de nous prodiguer durant toutes ces années. A M. le doyen ROYER et à M. le professeur GUNTZ vont nos remerciements pour les avis éclairés qu'ils ont bien voulu nous donner.

Enfin, toute notre gratitude va à M. le professeur VILLEY, qui a bien voulu s'intéresser à ces recherches dès 1939, à M. CAQUOT pour les encouragements qu'il nous a donnés lors de la mise au point du matériel de fabrication mécanique des éprouvettes de mortier et à M. LAFUMA qui nous a fait profiter de sa compétence en matière de ciment. Nos remerciements vont également à MM. les professeurs GAULT et WYART qui ont bien voulu accepter d'être nos juges.

En terminant ce bref tribut de reconnaissance, nous voulons remercier également notre collègue, G. POUZENS, dont l'habileté comme dessinateur et comme photographe nous a été d'un grand secours.

(1) Voir la bibliographie annexée, page 29.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Le 9 novembre 1891, dans un Rapport au Président de la République, le Ministre des Travaux Publics faisait connaître qu'il avait reçu, de la part du Congrès international des procédés généraux de construction, un vœu tendant à « voir déterminer les règles qui, dans tous les pays, devraient être uniformément admises pour le contrôle et la réception des chaux et ciments ». Reconnaissant le bien-fondé de cette requête, le ministre soumettait à la signature du Président le projet de décret instituant, près le ministre des Travaux Publics, une commission technique ayant pour mission « de formuler les règles uniformes à adopter dans l'essai des matériaux de construction et de déterminer les unités à prendre comme termes de comparaison ».

Ainsi se constituait en France le premier stade de la normalisation qui devait s'étendre par la suite à bien d'autres domaines. Il ne suffit pas d'imposer que tel produit devra présenter telles qualités, mais il faut préciser également la méthode de détermination de ces dites qualités. Deux méthodes d'essai, en effet, peuvent conduire à des résultats différents et provoquer des discussions entre fournisseur et acquéreur, tous deux de bonne foi.

En ce qui concerne les ciments, qui nous intéressent plus particulièrement, les essais auxquels on attache manifestement le plus d'importance sont les essais mécaniques. La Commission avait donc, en 1894, adopté pour les essais de rupture par traction la briquette en 8, déjà en usage, mais dont elle a précisé les dimensions et le mode de fabrication. Elle préconisa enfin les essais à la compression, « qui paraissent présenter de meilleures garanties d'exactitude » (4).

Les différentes Commissions qui se sont succédé ont abouti à la création de l'Association Française de Normalisation (AFNOR), organisme ayant pour but de provoquer l'élaboration des normes françaises. Des personnalités compétentes recueillent les suggestions des Intéressés et mettent au point les normes qui, après homologation du Comité Supérieur de la Normalisation, peuvent être imposées dans les cahiers des charges.

C'est ainsi que la dernière norme en usage, à notre connaissance, pour les liants hydrauliques, est celle dénommée B1-1, homologuée le 18 avril 1934. Elle précise, entre autres choses, la façon de gâcher, à la main, la pâte et le mortier de ciment (ou de chaux), la constitution du sable, les dimensions et le mode de remplissage des moules pour essai de cubes à la compression (les essais de traction, bien qu'encore en usage, ne figurent plus dans la norme), etc...

Malgré tout le soin apporté à la définition de ces essais, l'expérience a prouvé que, pour un même ciment, on obtenait des résultats différents d'un laboratoire à l'autre. Pour tâcher d'en déterminer les causes, la sous-commission des échantillons normaux de ciment de l'AFNOR

avait institué des séries d'essais à faire exécuter par divers laboratoires officiels et par des laboratoires de fabricants de ciment. Les mêmes échantillons de ciment, soigneusement homogénéisés par le fabricant, avaient été répartis dans une quantité de petites boîtes soudées et expédiées, à différentes époques, à tous les participants. La technique de fabrication des éprouvettes était celle prescrite par l'ancienne norme à laquelle on avait ajouté certains détails : l'emploi du sable de Leucate de composition préalablement vérifiée, proportion d'eau de gâchage fixée, tassement du mortier dans les moules réglé pour obtenir un poids uniforme des briquettes et des cubes, conservation des éprouvettes dans de l'eau saturée de chaux. Enfin, il était recommandé de noter les températures des eaux de gâchage et de conservation.

Les conclusions de M. RENGADE (16), rapporteur de la Commission, sont les suivantes : « Variations considérables des résultats d'un laboratoire à l'autre »... « La précision relative des divers essais varie avec la nature de l'essai et avec l'âge des ruptures »... « Il paraît impossible de compter sur un étalonnage fixe d'un laboratoire, même décalé en plus ou en moins. L'écart systématique, s'il existe, est défiguré par l'écart accidentel. »

Après avoir déterminé les « valeurs probables » de la résistance (en traction et en compression), médianes de l'ensemble des résultats donnés par les divers laboratoires, M. RENGADE a calculé les écarts relatifs de la médiane de chaque laboratoire par rapport à la médiane générale. Il a trouvé, dans une même série d'essais, des écarts variant, d'un laboratoire à l'autre, de 5 à 45 % en traction et de 2 à 41 % en compression (1). Un certain laboratoire, dans la dernière série d'expériences, présentait avec la médiane de l'ensemble des écarts, en traction, de 37 % à 2 j, 18 % à 7 j et 0 % à 28 j; pour un autre, en compression, les écarts étaient respectivement de 35, 11 et 4,5 %; par contre, pour un troisième, les écarts croissaient avec le temps et passaient de 0,7 à 12,5 et 23,5 %.

En présence de tels désaccords, la Commission, alors présidée par M. le professeur LE CHATELIER, avait envisagé au cours de sa réunion du 20 octobre 1935 « de confier à un expérimentateur le soin de procéder à des recherches méthodiques sur les différents facteurs qui agissent au cours des essais de ciment relatifs à la traction et à la compression et provoquent la divergence de résultats constatés entre les différents laboratoires ».

M. LE CHATELIER, puis M. CAQUOT, ayant bien voulu nous honorer de leur confiance et de leurs conseils et nous désigner pour cette mission, nous fûmes ainsi amenée à nous intéresser plus particulièrement à la question des essais des ciments.

(1) Une erreur matérielle s'est glissée dans notre note aux C. R., p. 985, t. 206 qui indiquait des variations de 4 à 15 %.

Nous avons donc, en avril 1936, visité officiellement neuf laboratoires effectuant des essais de ciment, afin de recueillir, auprès de personnalités compétentes, des renseignements et des avis autorisés et de relever aussi exactement que possible les conditions matérielles dans lesquelles s'exécutent les essais. De ces visites nous avons pu tirer les conclusions suivantes : les modes opératoires suivis par les divers laboratoires et les conditions matérielles présentent des différences qui peuvent expliquer, au moins en partie, les divergences entre les résultats.

Les variations dans les modes opératoires sont de deux sortes, celles qui sont dues à l'absence de précisions dans la norme AFNOR et celles qui sont dues aux dérogations faites à la dite norme.

Les conditions matérielles diffèrent d'une région à l'autre : température ambiante et degré hygrométrique de l'air, qualité des eaux utilisées, situation des salles de gâchage et de conservation.

Ayant eu à présenter le rapport sur les résultats des nouveaux essais prescrits par la Commission des ciments normaux, nous avons fait les remarques suivantes : Il n'apparaît pas tout d'abord nécessaire de remplacer le mortier 1/3 avec sable composé, par le mortier 1/2 ou 1/3 avec sable simple, puisque dans les deux cas on obtient une dispersion et une stabilisation de la médiane équivalentes. Mais une constatation très intéressante a été faite dans un laboratoire qui a fourni des graphiques montrant les résultats des essais journaliers. On est frappé par une variation continue d'un jour à l'autre, pendant 4 j, mettant en évidence — ce que nous avions déjà signalé — une modification continue et inconsciente de l'opérateur et par suite de la technique. Un autre graphique fait supposer un travail plus soigné au début de la semaine,

montrant l'influence de l'état physique de l'opérateur.

Dans un autre laboratoire, une variation brusque apparaît au cours de la même journée et produit une stabilisation de la médiane à une nouvelle valeur.

De l'ensemble des remarques faites, tant dans notre laboratoire que dans les autres, nous avons acquis la certitude que l'influence du « gâcheur » était primordiale, mais ne pouvait pas être mesurée. En effet, n'étant pas une mécanique immuable, le gâcheur est sujet à des variations intempestives dues à son état de fatigue physique ou même psychique.

Des conclusions analogues, dont nous avons eu connaissance récemment, avaient été formulées en 1926 par M. BIED (1) : « Malgré la précision des prescriptions officielles, dit-il, on voit que l'équation personnelle joue un rôle important dans les résultats des essais mécaniques des chaux et ciments... et plus loin : « il semble bien que la concordance (entre les résultats de plusieurs gâcheurs) est suffisante quand les gâcheurs s'appliquent. On est donc somme toute à la merci de l'homme qui gâche les briquettes et qui peut, par des petites variations imperceptibles de main-d'œuvre, amener des écarts de résistance assez grands ».

Un autre facteur nous a paru devoir également jouer un rôle important, c'est la température.

Et c'est ainsi que nous avons été conduite au présent travail. Mais, pour pouvoir étudier l'influence de la température sur les liants hydrauliques, nous avons tout d'abord cherché à éliminer le « coefficient personnel » en mettant au point un matériel entièrement mécanique qui permet, avec un petit nombre d'essais, de suivre l'évolution d'un phénomène.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DU MATÉRIEL DE FABRICATION DES ÉPROUVETTES

Le matériel que nous avons constitué pour la fabrication mécanique des éprouvettes de mortier destinées à notre étude comprend une « bétonnière-malaxeuse » et un « girateur » muni d'un distributeur automatique (5).

1° Bétonnière-malaxeuse (fig. 1).

Cette petite machine est constituée essentiellement par un cylindre d'acier entraîné par un moteur électrique et muni à l'intérieur d'une pelle-racleuse fixe.

Lorsque le cylindre tourne, le ciment et le sable que l'on y a introduits sont brassés par la pelle qui remonte la matière du fond et la laisse retomber à la surface. Le mélange à sec étant réalisé, on introduit l'eau, en marche, à l'aide d'un entonnoir approprié.

Nous avons essayé diverses tailles de cylindres, des inclinaisons variées de la pelle et de l'ensemble, des vitesses différentes; mais les vitesses lentes sont celles qui conviennent pour éviter la ségrégation. Dans un souci de normalisation simple, nous nous sommes arrêtée à des conditions facilement réalisables et reproductibles et conduisant à un matériel robuste et d'entretien aisé. C'est ainsi que nous avons choisi les dimensions du cylindre telles que l'on puisse y malaxer 2 kg de mortier, les inclinaisons ont été prises égales à 45°, enfin, le moteur adopté est un moteur synchrone monophasé du commerce à vis tangente tournant à 60 t/mn.

Le cylindre, de 15 cm de diamètre intérieur et de 20 cm de hauteur, tourne entre les ailes d'un fer à U écartées de 16 cm et sur lesquelles est fixé un pont portant la pelle-racleuse. Celle-ci est constituée par une tôle de 0,2 cm

d'épaisseur, de 18 cm de hauteur et de 4 cm de largeur; à 4,5 cm du fond, elle est élargie et chantournée pour passer par l'axe du cylindre. Un léger jeu évite le grippage de la pelle sur le fond et sur les parois du cylindre. Deux écrous à oreilles permettent de la dégager facilement et l'enlèvement rapide du cylindre s'obtient par desserrage à la main d'une grosse vis à tête moletée.

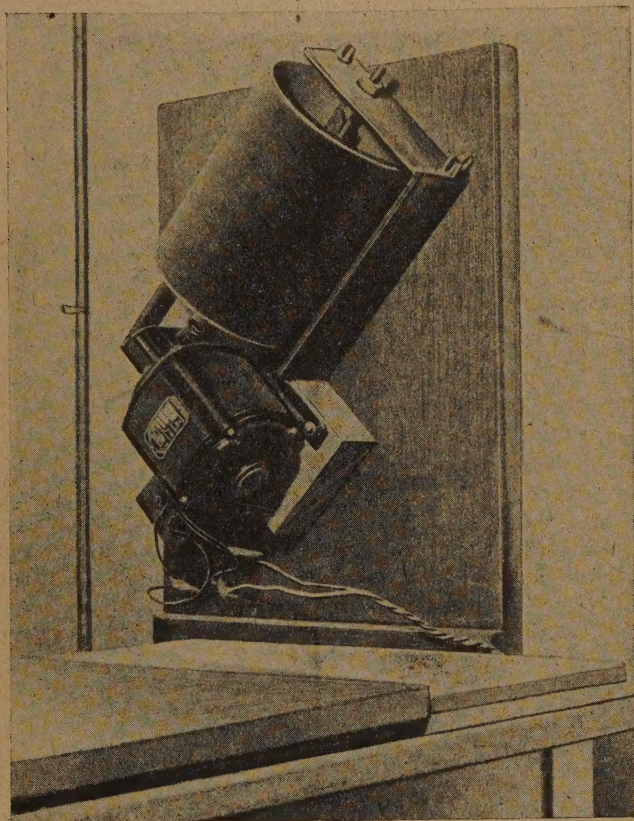


FIG. 1. — Bétonnière-Malaxeuse.

L'ensemble, moteur et fer à U, fixé sur un panneau de façon que l'axe de la bétonnière fasse un angle de 45° avec la verticale, est placé dans la salle calorifugée à 18°C (voir chap. IV, p. 10).

2° Girateur (fig. 2).

Le girateur comporte un plateau horizontal portant les moules, auquel un moteur électrique communique, par un excentrique, un mouvement de translation circulaire horizontal (giration).

Le plateau repose sur un bâti métallique par l'intermédiaire d'un chemin de roulement à billes de 20 cm de diamètre. Sur sa face supérieure sont fixées deux paires de petits fers cornières formant rails entre lesquels s'insèrent deux jeux de moules permettant la fabrication de trois cubes de 5 cm d'arête. Les moules sont assujettis solide-

ment au plateau par deux ponts en fer profilé reposant sur le distributeur automatique qui sert en même temps de couvercle.

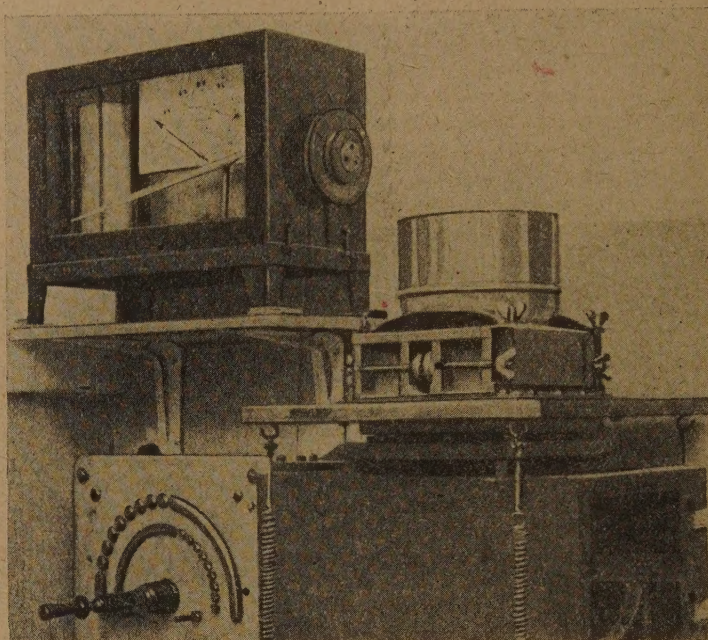


FIG. 2. — Girateur-Distributeur.

Le distributeur (fig. 3) est constitué par un récipient en forme de demi-tore horizontal auquel sont raccordés extérieurement un cylindre et intérieurement un cône, tous deux à axe vertical. Il comporte six trous de 2 cm de diamètre par où la matière pénètre dans les moules. Ce tore est soudé sur une plaque de bronze de $22 \times 16 \text{ cm}^2$ de surface et de 1 cm d'épaisseur dont la face inférieure a été soigneusement fraisée pour s'appliquer parfaitement sur les tranches des moules.

L'air s'échappe des moules, au remplissage, par des pattes d'araignées aménagées sur la face inférieure du distributeur.

Nous avons utilisé un moteur à courant continu entraînant le girateur par courroie pour pouvoir faire varier la vitesse dans de larges limites. La vitesse de 1 500 t/mn pour l'axe du girateur a été finalement adoptée, ce qui permettra, pour un mo-

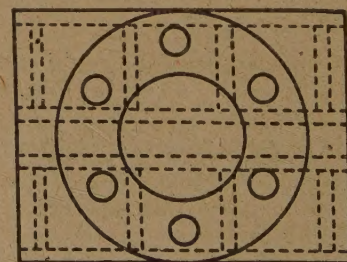
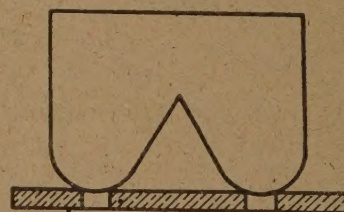


FIG. 3. — Distributeur.

dèle définitif, l'emploi d'un moteur triphasé asynchrone ordinaire à axe vertical tournant aux alentours de 1 450 t/mn; une légère variation de vitesse, en effet, n'a pas d'influence sensible sur les résultats. Il serait toutefois plus conforme au souci de normalisation qui nous a guidée d'adopter un moteur asynchrone-synchronisé.

Pour pouvoir faire varier l'amplitude de la giration, nous avons utilisé un dispositif analogue à celui du chariot de tour. Le doigt entraînant le plateau par l'intermédiaire d'un petit roulement à billes peut être excentré par rapport à l'axe de rotation. Quatre écrous avec rondelles GROWER assurent le blocage du système à une valeur de l'excentricité voulue et connue par le pas de la vis. En réalité, en raison des petites imperfections subsistant dans cette machine d'étude, l'amplitude n'est pas tout à fait la même à vide et en marche. L'amplitude réelle a été mesurée au microscope en visant les petits cercles brillants très visibles sur les moules pendant la marche; elle était de 3,25 mm dans nos essais définitifs.

Le poids des moules en bronze, du distributeur et de la matière (2 kg de mortier pour six cubes), en élevant le centre de gravité du système, a provoqué l'apparition d'une petite vibration verticale parasite. Pour la supprimer, nous avons dû amarrer le plateau supérieur au bâti par l'intermédiaire de quatre ressorts tendus chacun à 8 kg, soit au total une force d'application de 32 kg.

Enfin, pour assurer la stabilité, nous avons scellé l'ensemble sur un massif en béton solidaire du sol, après avoir vérifié l'horizontalité parfaite du plateau.

Le temps et les moyens matériels nous ont manqué lors de nos essais pour faire construire un appareil spécial permettant d'abaisser le centre de gravité pour améliorer le fonctionnement. Nous nous proposons d'entreprendre l'étude de ce perfectionnement. Le dispositif, muni de son moteur, pourra alors trouver aisément sa place dans la salle à 18° C.

3° Moules en bronze :

Tant pour les besoins du laboratoire que pour les nôtres, nous avons fait usiner huit moules en bronze permettant de mouler chacun trois cubes de 5 cm d'arête. Ce choix a été dicté par l'usage normal au laboratoire pour les essais de ciment dont les normes imposent la fabrication, en une gâchée de 1 kg de mortier, de trois cubes de 5 cm d'arête.

Après avoir essayé diverses réalisations, nous avons choisi le type suivant, qui s'est révélé très pratique à l'usage : le moule est constitué par deux plaques de bronze parfaitement planes de 0,85 cm d'épaisseur, de 5 cm de hauteur et de 21,8 cm de longueur. Des rainures fraisées avec grand soin sur une des grandes faces reçoivent quatre petites séparations constituées par des plaques de bronze de 0,5 cm d'épaisseur et de $5 \times 5,3$ cm² de surface. L'ensemble, posé sur une plaque de bronze de $21,8 \times 6,7$ cm² de surface et de 0,65 cm d'épaisseur servant de fond, est maintenu en place et d'équerre par deux tiges filetées portant deux gros écrous moletés. Enfin, pour ces essais spéciaux, nous avons utilisé un couvercle constitué par une plaque de bronze identique à celle servant de fond. Bien entendu, pour en assurer un montage toujours identique à lui-même, toutes les pièces sont repérées.

Ayant constaté, au cours de nos essais de compression l'influence notable exercée par un défaut de perpendicularité de deux faces des cubes, nous avons établi un appareillage destiné à assurer un montage correct.

La précision de fabrication sur laquelle on peut compter au démoulage est la suivante :

Surface : Les surfaces d'essai sont presque toutes supérieures à 25 cm² (faces en contact avec les grands côtés du moule); la médiane des valeurs est de 25,05 cm² avec un écart moyen relatif à la valeur théorique de 25 cm² égal à 0,3 % environ et un écart maximum relatif de 0,4 %.

Volume : Les volumes également sont presque tous supérieurs à 125 cm³, la médiane des valeurs est de 125,7 cm³. L'écart moyen relatif à la valeur théorique de 125 cm³ est de 0,6 % environ avec un écart maximum relatif de 0,7 %.

4° Fabrication des cubes de mortier :

Le processus de la fabrication des cubes de mortier est donc le suivant :

Le mortier est malaxé à la bétonnière, dans la salle à 18° C, pendant 1 mn à sec, puis 4 mn mouillé, soit au

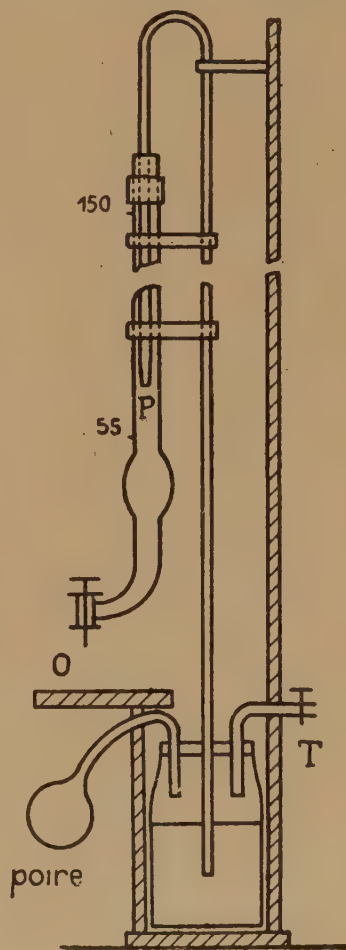


FIG 4. — Doseur d'eau automatique.

total pendant 5 mn. On dégage la pelle et on enlève le cylindre, dont on verse le contenu dans le distributeur fixé sur les moules. Ceux-ci, qui sont conservés dans la salle à 18° C, ne sont mis en place sur le girateur qu'à la dernière minute pour éviter un réchauffement du mortier. Le girateur est mis en marche pendant 5 mn, au cours desquelles le mortier pénètre automatiquement par petites fractions dans les moules et s'y organise, par suite de la giration, en couches horizontales compactes mais sans tassement. A l'arrêt, on utilise le distributeur lui-même pour araser la surface des cubes de mortier. Les bords des moules sont ensuite essuyés et la plaque de fermeture est glissée en sens inverse, ce qui achève le lissage de la surface sans provoquer de compression.

Tout coefficient personnel est ainsi supprimé dans la confection des éprouvettes, depuis le malaxage du mortier jusqu'au remplissage des moules; la plus ou moins grande habileté du gâcheur ou son état de fatigue n'interviennent plus. Tout se résume à la pesée des matériaux, ciment et sable, à la mesure de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à la surveillance du fonctionnement correct des appareils. Enfin, point qui n'est pas négligeable, le nombre d'éprouvettes confectionnées dans une journée peut être notablement augmenté puisqu'il n'y a pas à craindre la fatigue de l'opérateur qui entraîne des varia-

tions dans les résultats ainsi que nous l'avons signalé (p. 3, chap. 1).

En ce qui concerne la question de l'eau, pour permettre une économie de temps et éviter des erreurs de lecture dans l'emploi des éprouvettes graduées, nous avons fait établir un doseur, en nous inspirant de la burette à nivellement automatique. La figure 4 montre les modifications que nous avons fait apporter à un modèle existant : zéro inversé et reporté à la pointe déversante de la burette (0), soufflage d'une boule de 50 cm³ de capacité, nivellement réglable entre 55 et 150 cm³, par coulissage de la burette amenant la pointe P, par où arrive l'eau, à la graduation voulue; enfin une troisième tubulure (T) permet le remplissage de la bouteille étanche, sans démonter l'appareil.

Ainsi, lorsqu'on a plusieurs séries d'éprouvettes à faire avec le même liant, on règle la burette et on obtient ensuite automatiquement toujours la même dose (à 1/2 cm³ près).

Une seule chose reste à mettre au point, c'est le malaxage de la pâte de ciment qui ne peut pas se faire avec la bétonnière. Nous avons dû ainsi gâcher à la main la pâte pure servant à la détermination de la quantité d'eau normale pour le mortier. Nous étudions, pour résoudre ce problème, une petite « gâcheuse » mécanique analogue à celles qui servent au malaxage des pâtes alimentaires ou pharmaceutiques.

CHAPITRE III

COMPARAISON ENTRE LE PROCÉDÉ DE FABRICATION MÉCANIQUE ET LE PROCÉDÉ DE FABRICATION A LA MAIN

Pour mettre mieux en évidence l'influence du gâcheur dans la confection des éprouvettes, nous avons fait quatre séries d'essais comportant :

- 1° Une fabrication entièrement mécanique;
- 2° Une fabrication entièrement à la main;
- 3° Une fabrication semi-mécanique :
 - a) Malaxage mécanique et remplissage des moules à la main;
 - b) Malaxage à la main et remplissage mécanique.

Les liants étudiés ont été de quatre types différents :

- 1° Un ciment portland artificiel;
- 2° Un ciment de laitier;
- 3° Un ciment alumineux (fondu LAFARGE);
- 4° Une chaux éminemment hydraulique.

Pour le ciment portland et le ciment de laitier, la comparaison a pu être faite à l'aide de deux gâcheurs, celui du Laboratoire de Physique industrielle et un gâcheur mis aimablement à notre disposition par l'industrie locale. Certains essais ont pu être faits également par deux autres gâcheurs, celui du laboratoire du port des Ponts et Chaussées et un ouvrier de notre laboratoire n'ayant jamais fait ni vu faire d'essais de ciment.

Description des modes opératoires :

Les éprouvettes étaient constituées par du mortier au tiers (une partie de ciment et trois parties de sable) gâché avec une quantité d'eau (par kilogramme de mortier) déterminée par la formule : $55 + P/5$, où P est la quantité d'eau nécessaire pour amener 1 kg de liant à la consistance normale. Cette consistance normale est celle qui arrête la sonde de consistance à 6 mm du fond de la boîte tronconique contenant la pâte pure (norme AFNOR B1-1).

Le sable utilisé était du sable normal composé de Leucate contenant par parties égales des grains séparés par les tamis à trous circulaires de 0,5 à 1 mm, de 1 à 1,5 mm et de 1,5 à 2 mm de diamètre.

Le matériel de fabrication mécanique des éprouvettes, comportant la bétonnière-malaxeuse et le girateur, a été décrit dans le chapitre précédent.

Le girateur, dispositif mécanique de remplissage des moules, ne permettant pas, en l'état actuel, l'utilisation de moules d'éprouvettes de traction, toute la comparaison a été faite sur des essais à la compression de cubes de 5 cm d'arête (dimension normalisée pour les essais de mortier à la compression).

Le gâchage au malaxeur était effectué sur 2 kg de mortier au 1/3, soit 500 g de ciment et 1 500 g de sable, quantité nécessaire pour la confection de six cubes. Le ciment et le sable étaient mélangés à sec pendant 1 mn et malaxés, après addition de la quantité d'eau convenable, pendant 4 mn, soit au total 5 mn. La masse était ensuite versée dans le distributeur automatique du girateur surmontant deux moules en bronze de trois cubes chacun. Après une giration de 5 mn à la vitesse de 1 500 t/mn, avec une amplitude de 3,25 mm, les moules étaient arasés par le distributeur lui-même et munis d'une plaque de fermeture, en bronze également, achevant l'arasage. Après conservation dans une armoire à atmosphère saturée à 18° C, les cubes étaient démoulés et immergés dans l'eau au bout de 24 h.

La fabrication à la main a été faite conformément aux prescriptions du fascicule B1-1 de l'AFNOR déjà cité :

Gâchage de 1 kg de mortier au 1/3 pendant 5 mn après mélange à sec pendant 3 mn — remplissage en deux fois d'un moule à trois cubes en utilisant, pour répartir le mortier dans le moule, la tige d'acier réglementaire — arasage à la truelle maintenue verticalement — enfin conservation dans l'armoire à atmosphère saturée à 18° C. La seule dérogation aux prescriptions de la norme a été l'adjonction d'une plaque de fermeture sur le moule pour obtenir le même état de conservation de la face supérieure que dans la confection mécanique.

Dans la confection semi-mécanique, le mode opératoire a été le suivant :

a) Malaxage mécanique seul : gâchée de 2 kg de mortier dans les mêmes conditions que pour la confection entièrement mécanique et remplissage à la main de deux moules de trois cubes suivant la technique de la fabrication entièrement à la main.

b) Remplissage mécanique seul : gâchage à la main en deux fois de 2 kg de mortier et mélange des deux gâchées pendant 30 s puis remplissage suivant la technique entièrement mécanique.

Toutes les conditions autres que celles précisées ci-dessus ont été les mêmes dans les quatre séries d'essais : conservation des matériaux (liants en flacons hermétiques), fabrication et conservation des cubes dans leurs moules (en atmosphère saturée) à $18^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ — immersion après 24 h et conservation dans de l'eau saturée de chaux à $18^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ — essais à la compression par nos soins après 7 j d'âge, parallèlement au plan de giration, en utilisant la même machine d'essai, tout au moins pour chaque nature de liant hydraulique.

Les éprouvettes ont été fabriquées en 4 j (en 3 j seulement lorsque l'essai 3/b n'a pu être fait) à raison de six cubes de chacune des quatre catégories chaque jour, soit au total vingt-quatre cubes de chaque catégorie.

Pour éviter une fatigue au gâcheur, ce qui aurait pu entraîner une modification de sa fabrication, les essais ont été imbriqués les uns dans les autres : un gâchage mécanique suivant un gâchage à la main. Enfin, pour éviter l'influence de petites différences possibles entre les moules, nous avons effectué une permutation circulaire qui a fait intervenir tous les moules de la même façon dans les quatre méthodes.

Examen des résultats :

Pour comparer ces quatre procédés de fabrication d'éprouvettes, deux méthodes de dépouillement des résultats des essais à la compression pouvaient être envisagées : celle de la médiane et celle des moindres carrés qui donne comme valeur approchée la moyenne arithmétique.

Il nous a paru que dans la comparaison de ces diverses techniques d'essais la méthode de dépouillement des résultats avait une importance secondaire, puisqu'il s'agit de comparer les valeurs de la même grandeur obtenue par des procédés différents. On ne peut connaître la « valeur vraie » de la résistance du ciment, on ne peut que rechercher la « valeur la plus probable » pour la représenter parmi les résultats d'essais effectués sur « n » éprouvettes en traction ou en compression.

Nous avons choisi la médiane comme valeur la plus probable parce qu'elle semble mieux convenir au cas des ciments. Elle donne moins d'importance aux grands écarts dits « anormaux », elle est d'un calcul plus rapide et, enfin, elle est préconisée par l'AFNOR dans son fascicule B1-1. Nous avons constaté d'ailleurs que les deux valeurs « médiane » et « moyenne » différaient peu l'une de l'autre.

La dispersion a été définie par « l'écart moyen relatif » en pour cent : somme des valeurs absolues des écarts de tous les résultats du groupe à la médiane, divisée par le nombre de résultats et par la médiane et multipliée par 100. L'écart quadratique moyen relatif (racine carrée de la moyenne des carrés des écarts rapporté à la moyenne) la représenterait d'une façon plus rigoureuse. Mais, en raison du peu de différence constatée entre ces deux procédés de calcul quand il ne s'agit que de comparer les dispersions obtenues avec un même ciment, nous avons choisi la méthode la plus rapide.

Le tableau I (en annexe, pl. I) fait connaître, pour chacune des quatre techniques de fabrication, la nature du liant, le gâcheur, la médiane (ou plus exactement la moyenne des deux chiffres médians, le nombre d'essais étant pair) des charges de rupture à la compression, l'écart moyen relatif des vingt-quatre essais, l'écart maximum relatif en pour cent (écart absolu entre le nombre le plus élevé et le nombre le plus faible divisé par 2 et par la médiane et multiplié par 100), la moyenne des écarts maximum relatifs en pour cent dans une série de trois cubes provenant du même moule par rapport à sa médiane et la moyenne des écarts relatifs des médianes à la médiane générale des vingt-quatre cubes.

Les séries (a) et (b) proviennent de deux livraisons différentes de ciment artificiel et de laitier; les comparaisons entre les résultats ne peuvent se faire que respectivement dans chaque série.

Le tableau II fait connaître, d'une part pour le gâcheur R le rapport des médianes obtenues en répétant le même essai à la médiane de l'ensemble dans la technique mécanique et, d'autre part, le rapport des médianes obtenues pour les différents gâcheurs à la médiane du gâcheur R dans trois techniques. Certains essais n'ont pu être faits par plusieurs gâcheurs, par suite du manque de liant ou d'impossibilité de disposer des gâcheurs aux jours et heures voulus.

TABLEAU II. — RAPPORT DES MÉDIANES A CELLES DE R :

LIANT	GÂCHEUR	R	S	F	D
Ciment artificiel :					
Malaxeur et girateur.	1 1 1 1,015	1,005	0,995		
Tout main.....		1,135			
Malaxeur main		1,28			
Laitier :					
Malaxeur et girateur.		0,975			0,955
Tout main.....		1,15			0,975
Malaxeur main.....		1,26			
Fondu LAFARGE :					
Malaxeur et girateur.					1,025
Chaux :					
Malaxeur et girateur.					1,005

TABLEAU III. — RAPPORT DES ESSAIS A LA MAIN
OU SEMI-MÉCANIQUES AUX ESSAIS MÉCANIQUES.

	ÉCARTS moyens relatifs	ÉCARTS maximum relatifs	MOYENNE des écarts maximum	RAPPORT des médianes
Ciment artificiel :				
R Tout main	1,87	1,89	2,2	0,72
Malaxeur main...	1,38	1,33	1,44	0,69
S Tout main	2,35	2,39	1,70	0,82
Malaxeur main...	2,0	1,70	1,48	0,88
Main girateur ...	1,29	1,06	1,22	1,04
Laitier :				
R Tout main	1,57	1,79	2,4	0,83
Malaxeur main...	0,73	0,70	0,90	0,78
S Tout main	0,94	0,76	1,0	0,95
Malaxeur main...	0,97	1,07	1,0	0,98
Main girateur	1,20	0,92	0,68	1,08
Fondu LAFARGE :				
R Tout main.....	1,79	2,12	2,1	0,66
Malaxeur main ..	1,09	0,98	0,98	0,73
Chaux :				
R Tout main	1,56	2,02	1,9	0,85
Malaxeur main ..	1,0	1,22	1,19	0,85

Le tableau III donne, pour les différents liants et les divers gâcheurs, les rapports des résultats obtenus dans les techniques à la main ou semi-mécaniques à ceux obtenus mécaniquement : rapport des écarts moyens relatifs, des écarts maximum relatifs, des moyennes des écarts maximum dans une série de trois cubes et le rapport des médianes.

Comparaison des gâcheurs :

Le tableau II met en évidence tout d'abord la constance du même gâcheur dans le temps dans la technique mécanique. Quatre essais effectués avec un ciment artificiel pour le gâcheur R sur des éprouvettes fabriquées à la bétonnière et remplies au girateur ont donné un accord des plus satisfaisants. Seule la médiane d'un essai s'écarte de 1,5 % de la médiane des quatre essais. Or, il y a lieu de remarquer, ainsi qu'il a été précisé dans le chapitre précédent, que, si la bétonnière peut être considérée comme étant dans sa forme définitive, le girateur nécessiterait encore quelques perfectionnements d'ordre mécanique qu'il n'a pas été possible de réaliser dans la machine d'étude.

On constate également que les différents gâcheurs sont d'accord entre eux, quel que soit le liant, dans la technique mécanique. Le gâcheur spécialisé « S » a, au maximum, un écart de 2,5 % avec « R » sur la valeur de la médiane du ciment de laitier, ciment fragile au démoulage. Pour ne pas abuser de l'amabilité de la Société qui a bien voulu mettre certains jours son gâcheur à notre disposition les démoulages ont été opérés avant le délai de 24 h ; les éprouvettes étant encore fragiles, certains cubes ont eu leurs arêtes abîmées, ce qui explique les écarts moyens relatifs plus grands que pour le ciment artificiel et les autres petites divergences.

Le gâcheur « D », absolument novice, a d'emblée réalisé l'accord avec « R » avec des écarts sur la médiane de 4,5 % le premier jour et de 2,5 % le second jour, sur le ciment de laitier. L'on sait qu'un assez long entraînement est nécessaire au novice dans le gâchage à la main, pour obtenir des résultats cohérents. Dans le cas du ciment fondu, il n'y a plus lieu d'invoquer la fragilité des cubes au démoulage, pour expliquer les petites divergences, mais au contraire sa grande résistance à la compression, de l'ordre de 1 000 kg/cm² à 7 j. La rupture extrêmement brutale (analogue à celle des pierres basaltiques) a posé un problème difficile à résoudre, sur lequel nous reviendrons, celui de la rotule des machines d'essais.

Dans la fabrication entièrement manuelle, on constate un grand désaccord entre les deux gâcheurs spécialisés « R » et « S ». Avec « S » on obtient des médianes notablement plus élevées que celles de « R », de l'ordre de 14 à 16 % au lieu de 0,5 à 2,5 % au maximum de différence dans la fabrication mécanique.

Par contre, l'examen des résultats obtenus, dans le cas du gâchage mécanique seul, révèle un désaccord plus grand. Sans doute ce désaccord provient-il de la disparition d'une sorte de compensation qui se produisait entre les deux gâcheurs lors de la fabrication entièrement manuelle. Considérons, dans le tableau I, les médianes

obtenues par chaque gâcheur pour les quatre liants avec la technique manuelle et avec la technique semi-mécanique (malaxage mécanique seul) : elles présentent peu de différence, ou tout au moins des différences inférieures à celles que l'on obtient lorsqu'un même gâcheur effectue plusieurs fois le même essai à la main (voir chap. I). Ce renseignement précieux permet de conclure qu'en tout état de cause, on peut adopter dès maintenant le malaxage mécanique; on évite aux opérateurs une grosse fatigue qui peut entraîner un changement dans l'exécution de leur travail et, par la réduction du temps de fabrication des éprouvettes, on augmente le rendement du personnel.

Comparaison des techniques d'essai :

Au point de vue de la « médiane », relative à divers gâcheurs, nous avons vu que, de l'examen du tableau II, on pouvait déduire la supériorité de la fabrication mécanique sur celle à la main. Le tableau III permet de conclure que cette supériorité se conserve si on considère les « écarts moyens relatifs », les « écarts maximum relatifs » et les « moyennes de ces écarts maximum », dans une série de trois éprouvettes.

En effet, toutes ces valeurs sont, dans la technique manuelle, de l'ordre du double de celles obtenues dans la technique mécanique, sauf toutefois pour le ciment de laitier avec le gâcheur « S ». Nous avons vu plus haut que cette différence pouvait s'expliquer par la difficulté de démoulage des cubes girés de mortier de laitier avant le délai de 24 h.

La quatrième colonne (rapport des médianes) met en évidence une augmentation notable de la « valeur probable » de la résistance du liant par la giration. Celle-ci favorisant le placement sans tassement du mortier dans le moule, la compacité est meilleure et il est normal qu'on obtienne des chiffres de résistance à la compression plus élevés. Avec la chaux hydraulique utilisée, toutefois, le gain est moindre, car le remplissage à la main était plus aisé.

La variation dans le rapport des médianes obtenues « à la main » et « mécaniquement » découle naturellement des grandes divergences constatées entre les différents

gâcheurs dans la technique manuelle. Ainsi, le gâcheur « S » ayant donné à la main des chiffres notablement plus élevés que « R », l'augmentation de résistance est moindre.

Il y aurait donc lieu, évidemment, d'adopter une échelle de résistances différente de celle admise actuellement pour définir la qualité des divers liants. Mais, puisque les opérateurs sont d'accord avec la technique mécanique, il serait très facile de reconstituer une gamme de qualités en procédant à un essai systématique des divers liants hydrauliques.

Le perfectionnement mécanique qu'il serait possible d'apporter au « girateur » permettrait encore de diminuer la « dispersion » mesurée, nous l'avons vu, par « l'écart moyen relatif ». Il est actuellement de 2 à 2,5 % pour le ciment artificiel et pour la chaux. Pour le ciment de laitier et pour le ciment fondu, il est également possible d'agir sur les facteurs qui interviennent pour augmenter la dispersion.

Tous les résultats exposés ci-dessus ont été obtenus uniformément en exerçant l'effort de compression « sans aucune interposition de corps étrangers, contre deux des faces qui étaient au contact des parois latérales des moules » (AFNOR B1-1). En particulier dans le cas de la fabrication mécanique, l'effort était parallèle au plan de giration.

On peut se demander si la giration ne produit pas une hétérogénéité qui ferait que la résistance ne serait pas la même dans un plan perpendiculaire à celui précédemment défini.

De nombreux essais, qui ne trouvent pas leur place ici, ont été effectués et ont permis de conclure qu'il n'y a pas de couches de tassement et que le produit obtenu est isotrope.

Conclusion :

La conclusion de ce chapitre est très brève : il est possible, à l'aide d'une fabrication entièrement mécanique des éprouvettes, d'éliminer entièrement l'influence de l'opérateur dont on a vu l'importance au chapitre I.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES LIANTS HYDRAULIQUES

Différents auteurs ont entrepris l'étude de l'influence de la température sur la résistance mécanique des bétons fabriqués avec divers liants hydrauliques (1).

La précision obtenue avec le matériel de fabrication mécanique des éprouvettes de mortier de ciment nous a incitée à entreprendre une semblable étude sur des mortiers. Ne pouvant effectuer actuellement que le moulage de cubes

de 5 cm d'arête, nous nous sommes bornée dans notre étude aux essais de compression.

Quatre types différents de liants hydrauliques ont été étudiés, ce sont :

Un ciment Portland artificiel;

Un ciment alumineux (fondu LAFARGE);

Une chaux éminemment hydraulique;

Un ciment de laitier.

(1) Voir à la bibliographie les nos 2, 7, 11, 13, 15, 17 et 18,

Ce choix a été dicté par le désir d'étudier des types de liants aussi différents que possible, d'usage courant et existant sur place.

L'essai a donc consisté à soumettre à des efforts de compression des cubes de mortier de 5 cm d'arête, fabriqués mécaniquement (suivant le mode opératoire décrit p. 6 et 7), après un séjour dans de l'eau saturée de chaux qui a varié de quelques heures à 90 j, date limite que nous nous étions fixée initialement.

Afin de tracer avec certitude les courbes d'influence de la température sur les différents liants, les essais ont été effectués à quatre températures. La température de 18° C étant imposée pour les essais normalisés a été prise comme base de référence, les trois autres ont été choisies, l'une légèrement supérieure à 0° C, une autre aux environs de 45° C (température pouvant se trouver réalisée en été en Algérie), enfin une température limite aux environs de 70° C.

Nous donnerons successivement la description du matériel ayant permis la conservation des éprouvettes aux quatre températures et, sommairement, celle des machines de compression, enfin, la méthode d'essai et les résultats obtenus.

Description du matériel :

I. — MATÉRIEL DESTINÉ A LA CONSERVATION DES ÉPROUVETTES A TEMPÉRATURE CONSTANTE :

En dehors du matériel de fabrication mécanique précédemment décrit, nous avons dû procéder à la construction de quatre thermostats.

1° *Chambre thermostatique à 18° C :*

Au cours de nos recherches préliminaires, pour éviter le facteur inconnu « température », nous avons été amenée à faire construire, au laboratoire de Physique industrielle, une chambre dont la température était maintenue à 18° C.

Cette chambre, de $2 \times 1,5 \times 1,5$ m³, repose sur le rocher par l'intermédiaire d'une couche de dalles de liège expansé de 12 cm d'épaisseur. Les parois, protégées sur deux côtés par le rocher et sur les deux autres par des murs de maçonnerie de 60 cm d'épaisseur, ont reçu également un revêtement de liège expansé de 12 cm d'épaisseur garanti par une cloison en brique. La pièce est couverte en terrasse par une dalle de béton de 20 cm d'épaisseur, elle-même plaquée sur sa face inférieure d'un revêtement de deux couches du même liège. La porte a été protégée de la même façon, telle une porte d'armoire frigorifique.

La salle, ainsi calorifugée, a été munie d'un dispositif de réfrigération : En temps normal, la réfrigération de l'air se fait en circuit fermé. Lorsque la température s'élève, un thermomètre à mercure actionne un petit relais à mercure qui commande la bobine du conjoncteur-disjoncteur du moteur triphasé entraînant le compresseur. La place du thermomètre a été choisie de façon à maintenir constante, à $18^\circ \pm 0,2^\circ$ C, la température des bacs de conservation des éprouvettes qui tapissent une des

parois de la pièce. Ces bacs, en tôle émaillée de $24 \times 34 \times 10$ cm³ de capacité, pouvaient recevoir quatre rangées de trois cubes reposant sur une grille en laiton.

En raison de l'exiguïté de la chambre (on a utilisé au mieux la place disponible), pour éviter la présence de gaz carbonique nuisible au ciment, enfin et surtout pour éviter à l'opérateur le travail dans un air confiné, il a été nécessaire de faire une amenée d'air pur. Un canal de section carrée de 10 cm de côté relie la chambre à une terrasse. Lorsqu'un opérateur travaille, un jeu de vannes permet un appel d'air pur que le réfrigérateur règle à 18° C; l'air vicié est évacué par la porte laissée entr'ouverte. La température ambiante des salles adjacentes étant pendant peu de temps, à Alger, inférieure à 18° C, il n'a pas été jugé utile de prévoir une installation similaire pour le chauffage. Pendant la période froide, une simple lampe allumée dans la pièce suffit à compenser les pertes, le réfrigérateur n'intervenant que peu pour maintenir la température à 18° C.

Une armoire hermétique en bois, avec bacs à eau pour maintenir une atmosphère saturée d'humidité, a été installée dans cette pièce (une armoire à parois métalliques serait préférable). Les éprouvettes y étaient conservées dans leurs moules pendant 16 h, puis hors de leurs moules jusqu'à leur immersion.

Le démoulage à 16 h a été choisi pour des raisons de commodité (nettoyage et montage des moules pour des séries de fabrication se succédant à des intervalles de 24 h).

2° *Thermostats pour maintenir constantes des températures autres que 18° C.*

a) *Thermostats pour 45° et 70° C :* Ces deux thermostats sensiblement identiques étaient constitués chacun par un bassin en fer, peint au « bitublack », de 90 cm de longueur, de 70 cm de largeur et de 30 cm de hauteur, calorifugé avec des dalles de liège expansé de 12 cm d'épaisseur. Un croisillonement supérieur recevait quatre couvercles en fer, munis de poignées, également peints et calorifugés.

Quatre bacs en fer, recouverts extérieurement de « bitublack », de $35 \times 25 \times 20$ cm³ environ, étaient disposés sur cales dans les quatre secteurs du bassin. Ils pouvaient

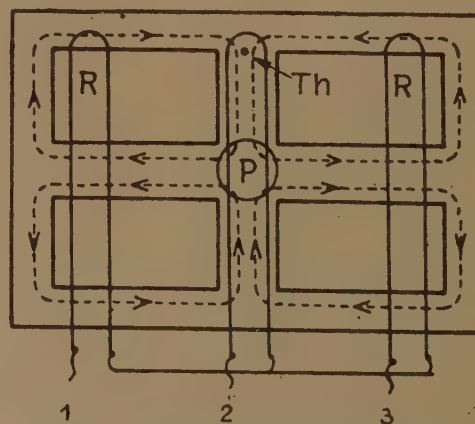


FIG. 5. — Thermostat pour 45° ou 70° C.

contenir vingt-quatre cubes posés sur des grilles en fer formant deux étages et laissant le libre accès du liquide sur toutes les faces des éprouvettes.

Ces deux appareils, installés dans une salle en demi-sous-sol, étaient munis de trois résistances électriques R (fig. 5) établies spécialement par la « Métallurgie du Nickel » (500 W-200 V pour le thermostat à 70° et 200 W-200 V pour celui à 45° C) pour chauffer directement l'eau du bassin. Elles étaient disposées à quelques centimètres du fond et régulièrement espacées pour constituer une grande surface chauffante. Pour homogénéiser la température dans tout le volume d'eau, une pompe élémentaire avait été installée. Elle était constituée par une hélice à quatre pales actionnée par un moteur électrique et tournant dans un tube de fonte. Deux ouvertures rectangulaires, à 180° l'une de l'autre, à la base du tuyau, servaient à l'aspiration tout en permettant le passage des deux branches de la résistance électrique centrale. Le refoulement s'effectuait en haut par deux ouvertures disposées à angle droit avec celles du bas. Un courant d'eau s'établissait ainsi autour de chacun des quatre bacs et de bas en haut. Le brassage de la masse d'eau était satisfaisant puisque les variations de température entre les diverses parties des petits bacs n'ont jamais été supérieures à 0,5° C. Le brassage de l'eau dans les bacs mêmes aurait conduit à une installation considérable à laquelle nous avons renoncé.

La régulation de la température de l'eau du bassin était obtenue à l'aide d'un thermomètre à mercure Th, à contacts, actionnant par relais le conjoncteur-disjoncteur triphasé du circuit d'alimentation des résistances chauffantes ainsi que le moteur de la pompe. Un ampèremètre enregistreur, inséré pendant 24 h dans le circuit, nous a permis de constater que le courant était établi pendant environ un quart du temps.

b) Thermostat pour 0° C $\pm$ ϵ : L'appareillage comprenait un bassin identique aux précédents en ce qui concerne les dimensions, l'aménagement et l'isolement, mais en bois recouvert de zinc intérieurement. Un long tube de cuivre replié en six branches était disposé de façon analogue aux résistances chauffantes des autres bassins; il était relié par caoutchouc à une source de froid, constituée par un mélange d'eau, d'alcool et de glycérine contenu dans un « frigidaire » du genre sorbetière. Un thermomètre à mercure Th (fig. 6) commandait par relais une petite pompe noyée dans le liquide froid et en produisait la circulation dans le tube de cuivre. Une pompe élé-

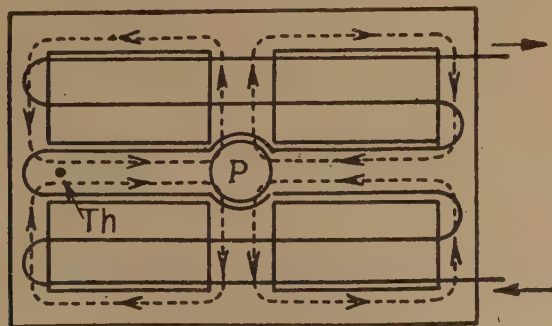


FIG. 6. — Thermostat pour 0° C.

mentaire P (identique à celle des thermostats à 45° et 70° C), mise en marche en même temps, assurait l'homogénéité de la température dans toute la masse d'eau du bassin. Pour éviter la congélation de l'eau, au voisinage du tube réfrigérant, une petite quantité de glycérine lui avait été ajoutée.

II. — MACHINES DE COMPRESSION.

Les deux machines utilisées pour l'essai à la compression des diverses éprouvettes étaient des presses hydrauliques à huile, de construction AMSLER (type Universel de 10 et 50 t), sans joints, causes de frottement du piston dans le cylindre. Le plateau compresseur inférieur était monté sur rotule afin de parer à de légers défauts de parallélisme des faces des cubes pouvant provenir du montage des moules.

Pour centrer rigoureusement les cubes sur la machine, ce qui est très important, nous avons tracé sur le plateau portant le cube — qui se centre automatiquement sur la rotule — une circonférence centrée de diamètre égal à la diagonale d'une face du cube (fig. 7).



FIG. 7. — Rotule inférieure.

Ainsi que nous l'avons déjà signalé, nous avons rencontré quelques difficultés au cours des essais du ciment fondu. Bien que nous ayons pris la précaution, dans tous les essais, de faciliter l'orientation de la rotule, en lui imprimant à la main une légère rotation, les cassures étaient défectueuses avec le ciment fondu conservé à froid qui exigeait pour se rompre des charges de l'ordre de 25 t. Avec des éprouvettes confectionnées spécialement, nous avons comparé trois types de rotules : la rotule inférieure décrite, une rotule suspendue (fig. 8) qui a donné sensiblement les mêmes résultats et une rotule supérieure à bille (fig. 9) qui a donné des chiffres plus faibles de 10 % et des cassures moins belles encore. Nous nous proposons d'élucider ce point de détail qui a son importance lors de charges



FIG. 8. — Rotule suspendue.



FIG. 9. — Rotule supérieure à bille.

élevées et d'essayer de constituer une rotule suspendue du type figure 8 — type le plus pratique comme emploi — mais de liberté d'orientation plus grande.

La surface des plateaux compresseurs (aucun matériau n'est interposé entre l'éprouvette et les plateaux), qui avait été cimentée, était semi-polie (à l'usage les surfaces perdent un peu de leur poli) et soigneusement essuyée après chaque essai.

Méthode d'essai :

Nous avons cherché à mettre en évidence l'influence de la température de l'eau de conservation sur le durcissement des mortiers en les immergeant dans les milieux définitifs, soit au démoulage (après 16 h ou après 24 h de fabrication), soit après un séjour plus ou moins prolongé dans l'eau à 18° C. L'action en effet pouvait n'être pas la même si le liant avait déjà durci dans l'eau à 18° C ou s'il était immergé dans le milieu choisi sans l'avoir été préalablement à 18° C.

La fabrication mécanique diminuant notablement la « dispersion », nous avons défini chaque état particulier par la « médiane » des résultats obtenus sur trois éprouvettes. Cela nous a conduit à la fabrication de soixante-douze cubes pour chacune des trois températures autres que 18° C, soit au total deux cent seize éprouvettes pour chaque liant.

Les soixante-douze cubes, destinés à l'étude d'une température autre que 18° C, étaient fabriqués en 3 j et cassés à raison de six au bout de 24 h, neuf à 3 j, douze à 7 j, douze à 28 j, quinze à 45 j et dix-huit à 90 j. Une série

TABLEAU IV.

N° des éprouvettes		MOULES				
		0-1	2-3	4-5	6-7	
1 ^{er} j	1 à 6	7 à 12	13 à 18	19 à 24		pour 3 et 28 j
2 ^e j	25 à 30	31 à 36	37 à 42	43 à 48		pour 7 et 45 j
3 ^e j	49 à 54	55 à 60	61 à 66	67 à 72		pour 1 et 90 j

TABLEAU V.

ESSAI	RÉFÉRENCE A 18° C		
	Sans immersion	Mise en eau après	
		16 h	24 h
1 j	49-57-65	(50-58-66) (1- 9-17)	
3 j			2-10-18
7 j			25-33-41
28 j			5-13-21
45 j			28-36-44
90 j			51-59-67

TABLEAU V bis.

ESSAI	MISE EN EAU CHAUDE OU FROIDE APRÈS					
	16 h	1 j	3 j	7 j	28 j	45 j
1 j	50-58-66					
3 j	3-11-19	4-12-20				
7 j	1- 9-17	26-34-42	27-35-43			
28 j		6-14-22	7-15-23	8-16-24		
45 j		29-37-45	30-38-46	31-39-47	32-40-48	
90 j		52-60-68	53-61-69	54-62-70	55-63-71	56-64-72

de trois éprouvettes était conservée à 18° C, sans immersion, pour essais à 24 h; toutes les autres étaient immergées après 24 h dans les bacs de conservation à 18° C et placées dans les thermostats à 0,5° C, 45° C et 70° C après des périodes de 16 h, 24 h, 3 j, 7 j, 28 j et 45 j.

Les tableaux IV et V schématisent les opérations. Dans chaque série de soixante-douze éprouvettes nous avons constitué des éprouvettes de référence conservées à 18° C.

Ainsi qu'il ressort des tableaux V, chaque groupe de trois éprouvettes comprenait des cubes provenant de trois gâchées différentes (une gâchée permettant le moulage de six cubes en deux moules de 3) pour éliminer de petites divergences possibles provenant des moules.

De même, nous avons imbriqué les uns dans les autres des essais pour différentes périodes afin de n'avoir pas à effectuer, à la même heure, plusieurs opérations (mise en eau dans le thermostat ou essai mécanique).

Le thermostat pour 70° C ayant été installé le premier, les essais qui lui correspondent présentent une légère différence avec ceux des autres thermostats. Ayant constaté au dépouillement des premiers résultats que l'immersion à 18° C après 16 h ou après 24 h conduisait aux mêmes chiffres, l'immersion après 16 h a été supprimée dans les fabrications ultérieures (numéros de cubes entre parenthèses dans le tableau V); elle a été remplacée par une immersion à 16 h à 45° ou à 0,5° C pour les essais à 1 et 7 j.

Durant toute la conservation, les températures ont été maintenues constantes à $\pm 0,2^\circ$ C et l'eau n'a pas été changée, mais la saturation en chaux $[\text{Ca}(\text{OH})^2]$ a été maintenue dans tous les bacs. Enfin, les éprouvettes n'ont été sorties de leur milieu de conservation qu'une minute environ avant leur mise en compression, par le soin qui a été pris d'amener les cubes auprès de la machine, dans un récipient contenant de l'eau de chaux à la température voulue.

Les conditions de fabrication du mortier et des éprouvettes ont été les suivantes :

Malaxage du mortier

1/3 à la bétonnière ... 1 mn à sec + 4 mn avec l'eau

Giration : { vitesse 1 500 t/mn
Confection { amplitude 3,25 mm
des éprouvettes { durée 5 mn

Plaque de fermeture au dérasage.

Essai : Effort de compression parallèle au plan de rotation.

Données concernant les liants utilisés, communiquées par les fabricants :

Ciment portland artificiel « Demarle Lonquety » de la Société des CEMENTS FRANÇAIS :

Poids du litre non tassé	1 075 g
Résidu au tamis de 4 900 mailles par cm ²	9,5 %
Temps de prise : début	3 h 40 mn
fin	6 h 25 mn
Gonflement	2 mm
Eau pâte pure	26,7 %
— mortier	10,8 %
Essais mécaniques (éprouvettes conservées 24 h à l'air humide, ensuite à l'eau à 17° C) sur mortier normal plastique au 1/3 :	

AGE	TRACTION	COMPRESSION
2 j	16,5 kg/cm ²	120 kg/cm ²
7 j	29,1 —	285 —
28 j	—	405 —

Ciment « fondu » de la Société des Chaux et Ciments de LAFARGE et du TEIL :

Poids du litre non tassé : environ 1 100 g;
 Résidu sur tamis de 4 900 m/cm² : 10 %;
 Début de prise : environ 2 h, retardée par une élévation de température jusque vers 30° C; le froid est sans action sensible.
 Gonflement : écartement nul.
 Essais mécaniques sur mortier normal, plastique au 1/3 (chiffres relevés sur des courbes) :

AGE	TRACTION	COMPRESSION
1 j	33 kg/cm ² env.	380 kg/cm ² env.
2 j	37 —	450 —
7 j	39 —	500 —
28 j	40 —	530 —

Chaux éminemment hydraulique « Tambour » de la Société POLIET et CHAUSSON :

Poids du litre	770 g
Finesse-tamis 900 m/cm ²	2 g
4 900 m/cm ²	15 g
Prise début	4 h 25 mn
fin	8 h 25 mn
Gonflement des aiguilles LE CHATELIER : zéro	
Essais mécaniques sur mortier plastique 1/3 :	

AGE	TRACTION	COMPRESSION
7 j	6 kg/cm ²	50 kg/cm ²
28 j	10 —	80 —
90 j	15 —	120 —

Ciment de laitier « Trèfle » de la Société des CEMENTS FRANÇAIS :

Poids du litre	990 g
Tamis de 4 900 m/cm ²	4 g
900 —	0,1 g
324 —	0
Temps de prise début	6 h 50 mn
fin	8 h 50 mn
Gonflement	0

Essais mécaniques (éprouvettes conservées 24 h à l'air humide, puis à l'eau douce) mortier normal plastique 1/3 (Eau 11,3 %) :

AGE	TRACTION	COMPRESSION
2 j	6 kg/cm ²	50 kg/cm ²
3 j	8 —	75 —
7 j	16 —	150 —
28 j	23 —	250 —
90 j	29 —	280 —

Résultats des essais :

Les résultats des essais des quatre liants aux quatre températures choisies sont rassemblés dans les tableaux VI à IX (en annexe) :

Colonne (1) : période écoulée entre la fabrication et l'essai;

Colonne (2) : période écoulée entre la fabrication et l'immersion;

Colonnes (3), (4), (5), (6) : respectivement, poids et charges de rupture à la compression des trois cubes et leur médiane pour des éprouvettes conservées à 0,5° C, 18° C, 45,5° C et 69,5° C.

Parallèlement, nous avons traduit ces résultats en un faisceau de courbes (graphiques I à IV pour chaque liant). Le graphique I donne, en fonction du temps, la résistance du mortier pour des immersions dans l'eau à 0,5° C après des temps de 1, 3, 7, 28 et 45 j, ainsi que la courbe de référence des éprouvettes conservées à 18° C. Les graphiques II et III donnent les mêmes courbes respectivement pour 45,5° C et pour 69,5° C.

Enfin, sur le graphique IV, nous avons tracé un faisceau de courbes donnant, pour chaque période de rupture, la résistance mécanique en fonction de la température. Sur ce même graphique a été tracée la courbe de variation de la résistance mécanique en fonction de la température et de la période de rupture pour différentes durées d'immersion dans le milieu définitif.

Examen des résultats :

Nous n'avons pu imbriquer les uns dans les autres, pour éviter des complications inextricables, sources d'erreurs inévitables, les essais d'éprouvettes conservées aux températures de 0° C, 45° C et 70° C.

La fabrication totale des éprouvettes ayant duré quatre mois, il a fallu nous assurer que le liant s'était bien conservé toujours le même; aussi avons-nous, pour chacune de ces températures, fabriqué une série d'éprouvettes de référence, conservées à 18° C.

Nous avons ainsi trois séries d'essai à 18° C qui permettent de fixer la précision de nos résultats. Nous avons donné, à titre indicatif, la précision obtenue avec vingt-quatre éprouvettes fabriquées à la suite et rompues au bout de deux ans.

Le dépouillement des résultats suivant la méthode décrite dans le chapitre III conduit aux résultats consignés dans le tableau X.

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

TABEAU X. — ESSAIS A 18° C.

CIMENTS	AGE d'essai	MÉDIANE	MÉDIANE des médianes	ÉCART moyen relatif des médianes	ÉCART moyen relatif des 9 essais	ÉCART maximum relatif des 9 essais
	jours	kg/cm ²	kg/cm ²	%	%	%
Port- land	1	108	107	1,5	2,2	3,7
	3	285	285	0,6	1,5	4,0
	7	402	401	0,6	0,7	1,2
	28	593	593	0,6	1,8	4,4
	45	646	648	1,3	2,0	3,5
	90	688	688	3,5	4,3	7,6
	2 ans (24 épr.)	766	765	1,8	3,5	9,5
Fondu	1	847	848	2,4	3,0	6,6
	3	916	916	2,5	2,6	6,1
	7	960	960	1,1	2,4	4,8
	28	1 050	1 090	6,9	8,5	12,4
	45	1 028	1 040	2,9	4,9	12,4
	90	1 040	1 040	0,6	1,9	3,8
	2 ans (1) (21 épr.)	(996)	(1 020)	3,6	3,8	6,8
Chaux	1	31,6	31,6	0,1	1,9	4,3
	3	64,8	65,0	0,7	1,9	4,6
	7	96,5	96,8	2,3	3,2	9,1
	28	171	168	3,9	3,5	5,8
	45	215	215	2,8	3,2	6,7
	90	283	283	2,3	2,9	5,5
	2 ans (24 épr.)	410	410	1,7	2,1	4,9
Laitier	1	20,3	20,3	6,7	7,2	11,6
	3	60,2	59,6	3,4	7,2	6,6
	7	119	120	1,7	2,4	5,0
	28	298	297	1,6	2,9	6,0
	45	358	358	0,9	1,6	3,1
	90	461	458	1,2	2,0	4,7
	2 ans (24 épr.)	827	831	2,0	2,8	6,5

(1) Les résultats concernant le ciment fondu à deux ans sont intéressants seulement au point de vue de l'étude de la dispersion; ce ciment provenant d'une fourniture ultérieure, la valeur de la médiane à deux ans ne peut pas être rapprochée de celle des autres médianes. D'autre part, on a constaté sur la surface des cubes la présence d'une couche blanchâtre onctueuse qui, au contact des plateaux de la presse, faisait le même effet qu'un graissage : les trois premiers cubes essayés ont donné en effet des résistances à la compression de l'ordre de 500 kg/cm² au lieu de 1 000 kg/cm² obtenus en enlevant, pour les suivants, la couche blanchâtre. De plus, en raison des circonstances (la guerre ayant interrompu nos travaux), la teneur en eau de chaux des bacs n'a pas été vérifiée et les cubes sont restés dans la même eau pendant deux ans.

L'examen des chiffres précédents montre qu'on obtient les mêmes résultats que ceux indiqués dans le chapitre III avec des séries de vingt-quatre éprouvettes fabriquées dans un laps de temps de 4 j et âgées de 7 j.

C'est ainsi que la médiane des neuf résultats est égale à la médiane des médianes des trois séries d'essais à moins de 1 % près, sauf deux accidents à 28 j pour la chaux où l'écart est inférieur à 2 % et pour le ciment fondu où l'écart atteint près de 4 % à 28 j (et près de 2,5 % à deux ans).

L'écart moyen relatif des neuf résultats qui mesure la « dispersion » est de l'ordre de 2 % pour le ciment portland et de 3 % pour le ciment fondu, la chaux et le ciment de laitier, sauf dans quatre cas qui sont des accidents que nous allons examiner :

A 90 j, le ciment portland présente une série anormale, celle correspondant aux essais à 0° C. Tous les résultats sont inférieurs à la médiane générale des neuf essais et conduisent à une résistance à la compression égale à celle obtenue à 45 j. Cet accident n'a pu être expliqué.

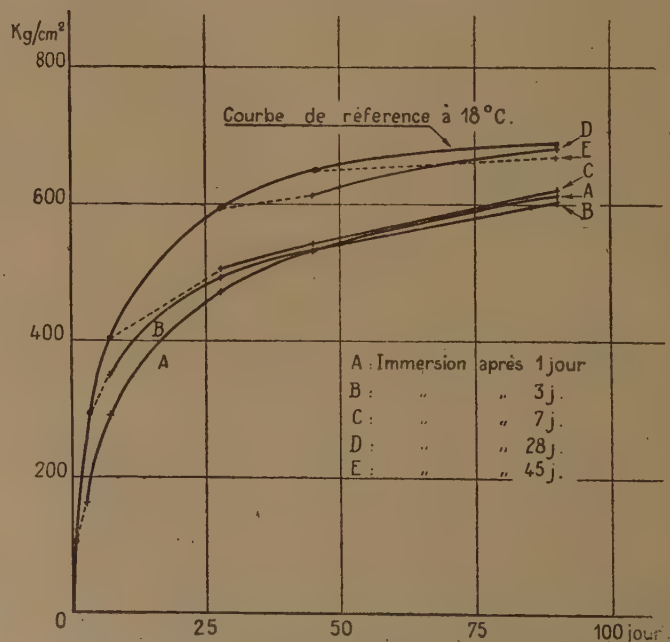
Dans le cas du ciment fondu, au contraire, les séries anormales sont dues à l'influence de l'eau de chaux de conservation. En effet, nous avons constaté (voir p. 18) que des éprouvettes de ciment fondu conservées dans de l'eau de pluie avaient une résistance mécanique supérieure à celles conservées dans de l'eau de chaux. Or, malgré une surveillance constante, le ciment fondu étant très avide de chaux, la teneur en chaux de l'eau de conservation s'est trouvée parfois inférieure à la saturation, précisément dans les séries 1 et 3 à 28 j. D'autre part, en traçant la courbe des durcissements avec une échelle logarithmique pour les temps, on constate que le point 1 090 kg/cm² (médiane des médianes à 28 j) est manifestement faux. La valeur réelle se situe aux alentours de 1 020 kg/cm² (voir graphique B-V, courbe 24 h, Ch. 18°, p. 18).

La grande dispersion obtenue à 24 h du ciment de laitier est due à la fragilité, déjà mentionnée, des éprouvettes; tous les résultats de la série correspondant à 0° C sont inférieurs à la médiane générale. Comme pour le fondu, nous avons constaté que ce ciment était très avide de chaux, mais des essais comparatifs de conservation dans l'eau de chaux et dans l'eau de pluie n'ayant pas été pratiqués, l'influence de la chaux n'a pu être mise en évidence.

Conclusion :

D'après l'examen des résultats à 18° C, on peut compter sur une dispersion de l'ordre de 3 % pour la résistance mécanique des éprouvettes.

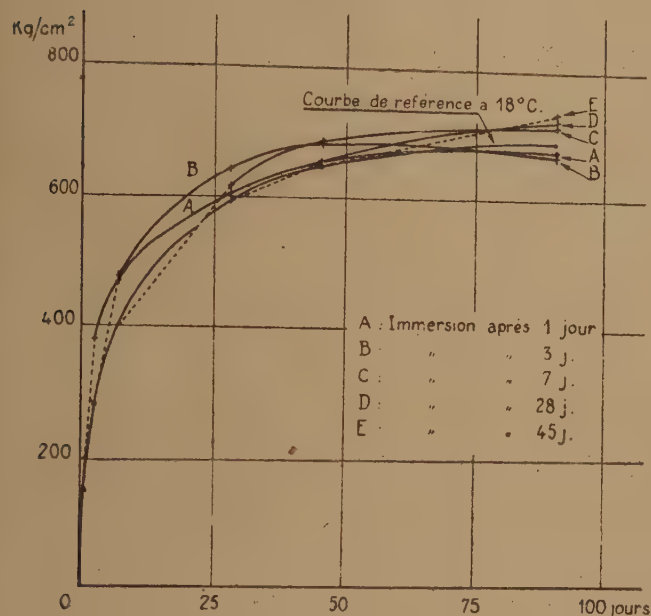
A. — CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL
(planche II, graphiques A-I, II, III et IV).



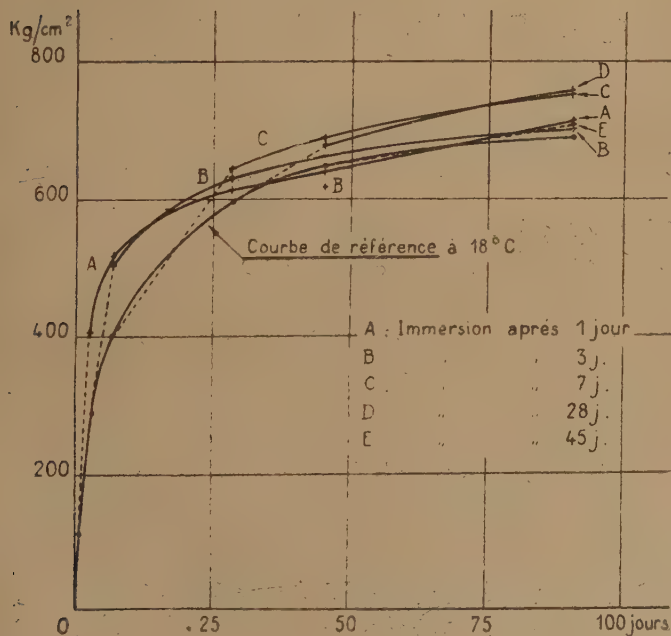
GRAPHIQUE A-I. — Ciment portland : conservation à 0° C.

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

Les courbes de durcissement des éprouvettes conservées aux températures de 0,5° C, 45,5° C et 69,5° C ont la même allure que celles des éprouvettes conservées à 18° C

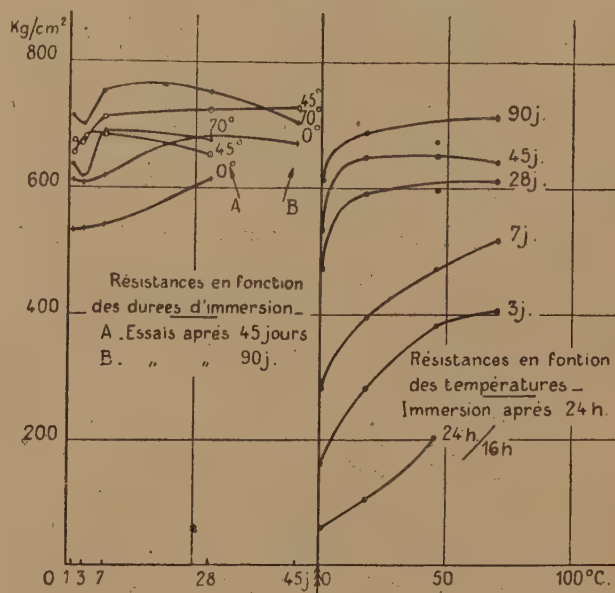


GRAPHIQUE A-II. — Ciment portland : conservation à 45° C.



GRAPHIQUE A-III. — Ciment portland : conservation à 70° C.

(cette dernière étant prise comme courbe référence). Si, pour chaque période d'essai, on fait le rapport de la médiane des charges de rupture obtenues aux tempéra-



GRAPHIQUE A-IV. — Ciment portland : Résistances en fonction des températures et des durées d'immersion.

tures de 0°, 45° et 70° C à celle de la température de référence 18° C, on obtient les coefficients suivants :

TABEAU XI.

AGE d'essai	IMMERSION milieu définitif après	RAPPORT DES CHARGES DE RUPTURE à celles obtenues à 18° C pour des températures de		
		0,5° C	45,5° C	69,5° C
jours				
1	16 h	0,58	1,89	
3	16 h	0,44	1,35	1,44
	24 h	0,58	1,34	1,42
7	16 h	0,57	1,12	
	24 h	0,71	1,19	1,29
	3 j	0,87	1,18	1,25
28	24 h	0,80	1,01	1,03
	3 j	0,83	1,08	1,06
	7 j	0,85	1,04	1,08
45	24 h	0,82	1,01	0,99
	3 j	0,82	1,05	0,95
	7 j	0,84	1,06	1,06
	28 j	0,94	1,01	1,04
90	24 h	0,89	0,98	1,03
	3 j	0,88	0,97	1,02
	7 j	0,90	1,04	1,09
	28 j	0,99	1,05	1,09
	45 j	0,97	1,06	1,03

1° Immersion dans le milieu définitif vingt-quatre heures au maximum après la fabrication :

Le froid retarde le durcissement du ciment portland, mais il devient peu à peu sans influence puisqu'à 90 j la résistance à 0° C est les 9/10 de celle à 18° C.

La chaleur, au contraire, accélère ce durcissement, mais pendant les premiers jours seulement; elle est sans action après 28 j (voir graphique A-IV).

2° Immersion dans le milieu définitif après des séjours supérieurs à 24 h dans l'eau à 18° C :

Jusqu'à 7 j, le froid agit de la même façon, quel que soit le séjour à 18° C, mais il n'a plus d'influence après un séjour de 28 j à 18° C.

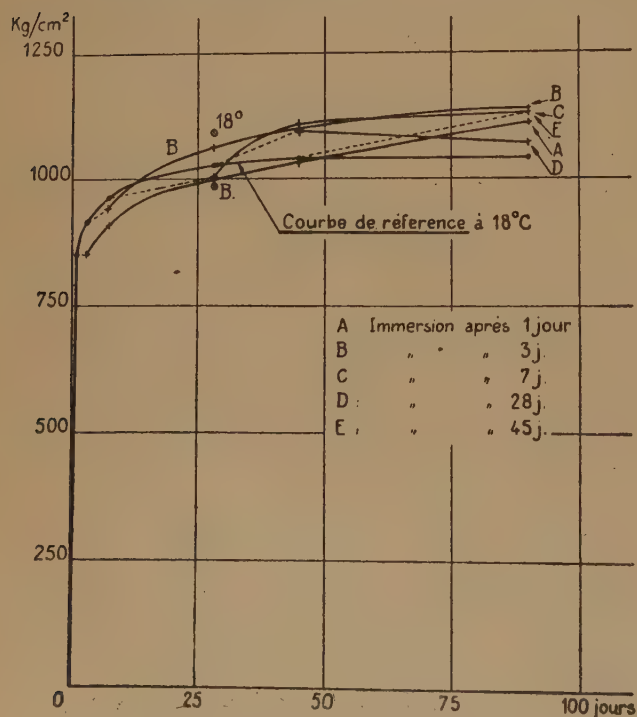
L'époque à laquelle se fait l'immersion à la chaleur a peu d'influence sur la résistance mécanique; en effet, les résistances à 45° C et à 70° C sont, à 2 ou 3 % près, les mêmes que celles des cubes immergés après 24 h.

Conclusions :

Si l'on compare des séries d'essais mécaniques d'éprouvettes de mortier de ciment portland, il y a lieu de tenir compte de la température, au moins jusqu'à 7 j. Un écart de 10° C, en effet, de part et d'autre de la température prescrite 18° C donne, à 3 j d'âge, des écarts sur la résistance à la compression atteignant 20 %.

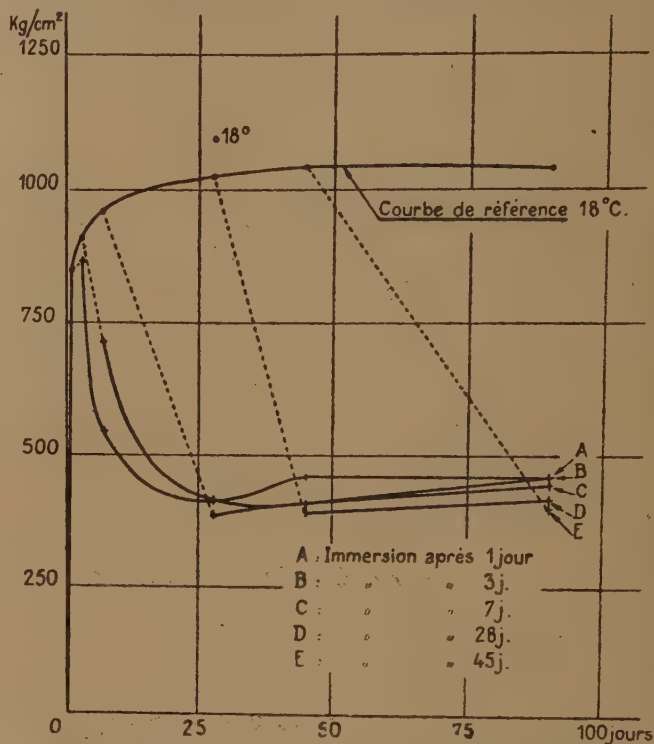
Quel que soit leur mode de conservation, toutes les éprouvettes présentent la même forme de cassure et la même teinte intérieure.

B. — CIMENT FONDU LAFARGE
(pl. III, graphiques B-I, II, III et IV).



GRAPHIQUE B-I. — Ciment fondu : conservation à 0° C.

Contrairement à ce qui a été constaté dans le cas du ciment portland, l'allure des courbes de durcissement du mortier de ciment fondu aux températures élevées est totalement différente de celle du mortier conservé à 18° C.



GRAPHIQUE B-II. — Ciment fondu : conservation à 45° C.

TABEAU XII.

AGE d'essai	IMMERSION milieu définitif après	RAPPORT DES CHARGES DE RUPTURE à celles obtenues à 18° C pour des températures de		
		0,5° C	45,5° C	69,5° C
jours				
1	16 h	0,98	1,05	
3	16 h	0,96	0,88	0,42
	24 h	0,93	0,95	0,43
7	16 h	0,97	0,50	
	24 h	0,95	0,56	0,40
	3 j	0,98	0,74	0,36
28 (1)	24 h	0,98	0,41	0,44
	3 j	0,96	0,40	0,44
	7 j	0,98	0,38	0,41
45	24 h	0,99	0,44	0,43
	3 j	1,06	0,39	0,43
	7 j	1,06	0,39	0,39
	28 j	1,05	0,37	0,35
90	24 h	1,07	0,44	0,45
	3 j	1,10	0,45	0,46
	7 j	1,09	0,42	0,42
	28 j	1,03	0,40	0,40
	45 j	1,09	0,39	0,36

(1) Pour le calcul des coefficients, la résistance à 28 j à 18° C a été prise égale à 1 020 kg cm², valeur déduite de la courbe logarithmique, ainsi qu'il a été expliqué page 14.

Le tableau XII donne le rapport des charges de rupture obtenues à 0,5°, 45,5° et 69,5° C à celles obtenues à 18° C pour les différentes périodes d'essai.

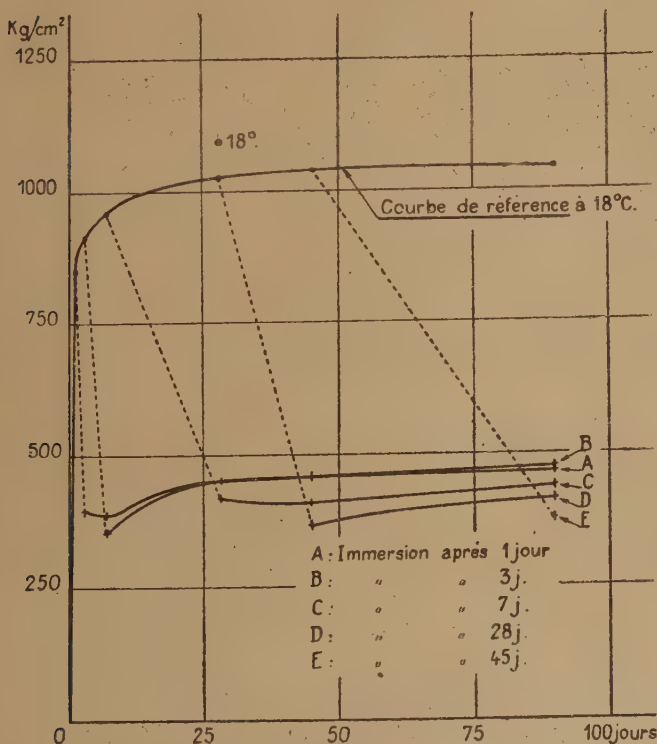
1° Immersion dans le milieu définitif 24 h au maximum après la fabrication :

Ainsi que le certifie le fabricant, le froid n'a qu'une faible influence sur le ciment fondu, même aux premiers jours du durcissement. Un incident a permis de constater que la gelée elle-même n'avait pas d'effet sur la résistance mécanique : un défaut dans la régulation de la température s'étant produit, alors que la saturation en chaux n'était plus réalisée, les cubes ont été trouvés emprisonnés dans de la glace au moment de faire l'essai à 90 j. L'essai a été reculé de ce fait de 6 j pour permettre le dégel et, non seulement on n'a pas constaté d'effet nuisible, mais, au contraire, on a obtenu un léger gain de résistance sur celle des éprouvettes à 18° C, gain qui peut s'expliquer par le défaut de saturation en chaux.

Il n'en va pas de même à 45° et à 70° C où la résistance à la compression subit une baisse de 50 à 60 % avec changement de teinte du mortier qui passe du gris au chocolat. L'examen aux rayons X a montré, ainsi qu'on le verra plus loin (chap. v, p. 27), que cette chute était due à la présence d'aluminate tricalcique hydraté cubique.

2° Immersion dans le milieu définitif après des séjours supérieurs à 24 h dans l'eau à 18° C :

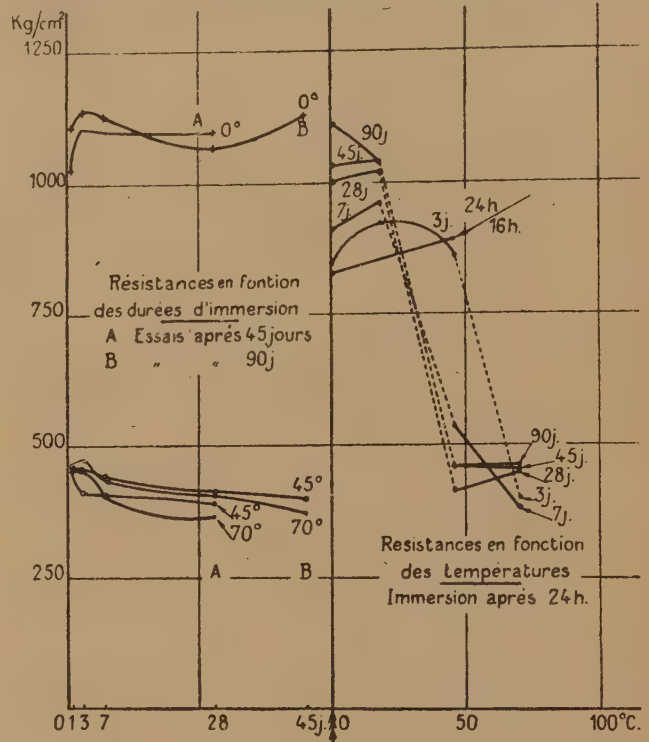
Quel que soit le temps passé à 18° C, le froid n'a pas d'effet nuisible. La chaleur, par contre, est plus nocive. Le rapport de la résistance à chaud à la résistance à 18° C baisse progressivement; il atteint des valeurs de 10, 15



GRAPHIQUE B-III. — Ciment fondu : conservation à 70° C.

et même 20 % plus faibles pour des immersions à 28 et 45 j aux températures de 45° et 70° C que pour des immersions après 24 h.

L'élévation de température au cours du durcissement est donc tout à fait préjudiciable au ciment fondu.



GRAPHIQUE B-IV. — Ciment fondu : Résistances en fonction des températures et des durées d'immersion.

Dans le but de rechercher si la transformation du matériau à la chaleur s'opérait rapidement, une autre série d'éprouvettes a été fabriquée en vue d'essais à courte échéance avec démoulage à 4 h 30 mn d'âge. Les cubes ont été immergés dans deux bains différents, en eau de pluie et en eau de chaux, pour en déduire en même temps l'influence de l'eau de conservation.

Le tableau XIII (en annexe, pl. VI) donne les résultats de ces deux recherches qui ont dû être faites sur une nouvelle livraison de ciment fondu, notre réserve étant épuisée :

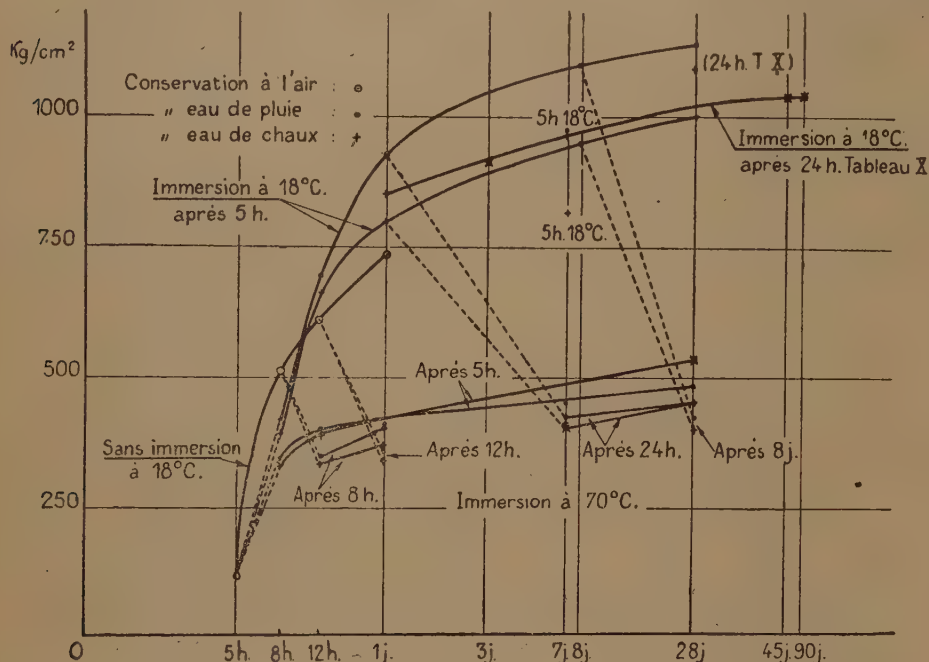
Colonne (1) : période écoulée entre la fabrication et l'essai;

Colonne (2) : période écoulée entre la fabrication et l'immersion;

Colonnes (3), (4), (5) : respectivement charge de rupture à la compression des trois cubes et leur médiane pour des éprouvettes conservées à 18° C à l'air humide, dans l'eau de pluie et dans l'eau de chaux.

Colonnes (6), (7) : respectivement charge de rupture à la compression des trois cubes et leur médiane pour des éprouvettes conservées dans l'eau de pluie et dans l'eau de chaux à 70° C.

Le graphique B-V donne, avec une échelle logarithmique pour les temps, la variation de résistance avec le temps aux températures de 18° et de 70° C et pour les deux natures de conservation.



GRAPHIQUE B-V. — Ciment fondu : conservation à 70° C (eau de pluie et eau de chaux).

Le tableau XIV renferme les rapports des résistances à la compression à 70° C à celles obtenues à 18° C :

TABEAU XIV.

AGE d'essai	IMMERSION milieu définitif après	RAPPORT DES CHARGES DE RUPTURE A 70° C à celles obtenues à 18° C pour les milieux	
		eau de pluie	eau de chaux
8 h	5 h	0,82	0,83
12 h	5 h	0,58	0,60
	8 h	0,50	0,51
24 h	5 h	0,45	0,51
	8 h	0,44	0,46
	12 h	0,38	0,42
7 j ⁽¹⁾	5 h	0,46	0,50
	24 h	0,48	0,54
28 j	5 h	0,42	0,53
	24 h	0,42	0,47
	8 j	0,40	0,41

(¹) Les essais à 7 j ne sont donnés qu'à titre indicatif; ces éprouvettes, les premières fabriquées, ont été démoulées à 3 h 30 mn d'âge pour un essai d'immersion à 4 h. Mais on a constaté que le durcissement était insuffisant pour permettre la manipulation des éprouvettes qui ont subi de ce fait une détérioration.

De l'examen des tableaux XIII et XIV, on déduit les remarques suivantes :

1° La conservation dans l'eau de chaux diminue la résistance à la compression à 18° C de 5 à 6 % jusqu'à 12 h d'âge et dans des proportions atteignant 15 % à partir de 24 h pour des immersions à 5 h.

2° Par contre, l'eau de chaux semble atténuer l'effet nocif de la chaleur, tout au moins pour des immersions rapides.

3° Cet essai confirme la conclusion tirée de l'examen du tableau XII, à savoir que l'influence de la chaleur se fait d'autant plus sentir que celle-ci intervient à des temps plus éloignés de la prise.

4° La transformation en aluminat tricalcique cubique est déjà commencée après une immersion de 3 h seulement à 70° C, puisque à 8 h d'âge les résistances, aussi bien dans l'eau de chaux que dans l'eau de pluie, ont subi une baisse de 17 à 18 %, baisse qui atteint 40 % à 12 h d'âge et 7 h d'immersion à 70° C.

5° La conservation en air humide à 18° C est favorable au durcissement dans les premières heures, mais après 12 h les résistances sont

plus faibles que celles des éprouvettes immergées.

Conclusions :

Les variations de température au-dessous de 18° C (tout au moins jusqu'à 0° C) ont une influence négligeable sur les essais de ciment fondu.

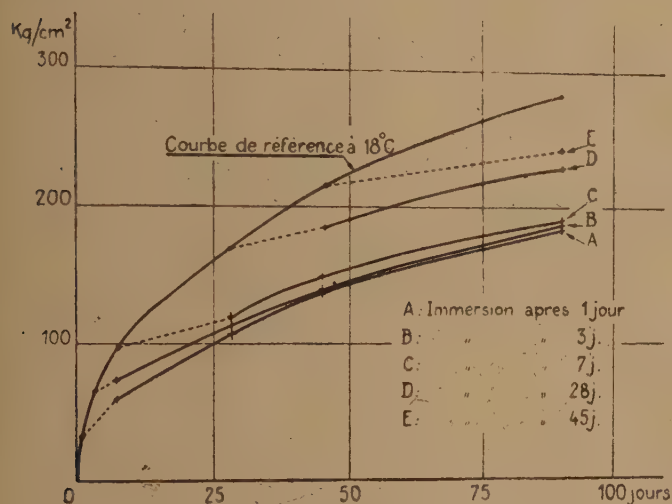
Par contre, au-dessus de 18° C, il y a lieu d'être très circonspect pour ne pas atteindre la température de transformation en aluminat tricalcique cubique, phénomène que nous nous proposons d'étudier ultérieurement. Il faudrait veiller à ce que, à aucun moment au cours du durcissement, la température ne puisse s'élever au-dessus de cette température critique, puisque la transformation s'opère très rapidement.

Ce point est particulièrement intéressant si on rappelle le dégagement de chaleur important signalé par divers auteurs (¹) lors de la prise du ciment alumineux. En effet, dans le cœur de grosses masses de béton, la température peut atteindre des valeurs notables et s'y maintenir un temps suffisant pour permettre la transformation en aluminat tricalcique cubique et provoquer une baisse de résistance mécanique de l'ouvrage.

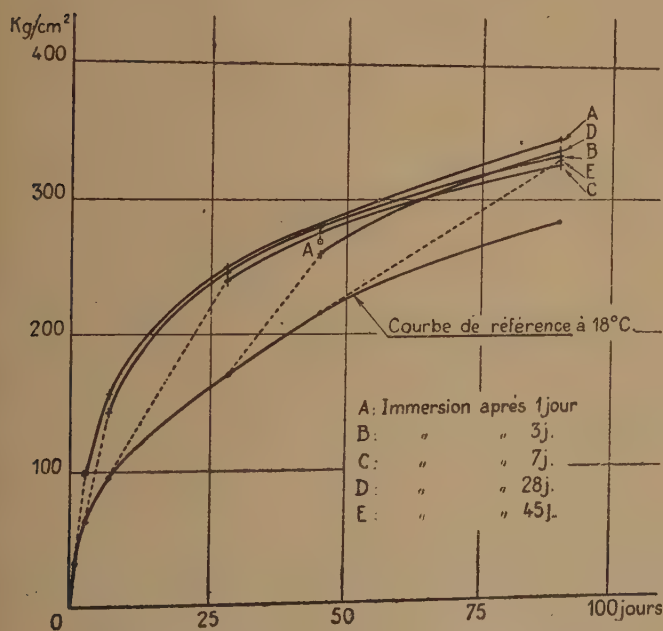
(¹) Voir à la bibliographie nos 1, 11, 15 et 17.

C. — CHAUX HYDRAULIQUE
(pl. IV, graphiques C-I, II, III et IV).

L'examen des graphiques I à IV relatifs à la chaux montre que la chaux n'a pas encore son durcissement définitif à 90 j; au contraire, le ciment fondu l'avait atteint et le ciment portland en était très rapproché, puisque sa résistance n'a augmenté que de 11 % entre 90 j et 2 ans. Si la résistance de la chaux a augmenté de 32 % entre 45 et 90 j, elle s'est encore accrue de 45 % entre 90 j et 2 ans et un pointé sur papier logarithmique montre que l'état permanent n'est même pas encore atteint.

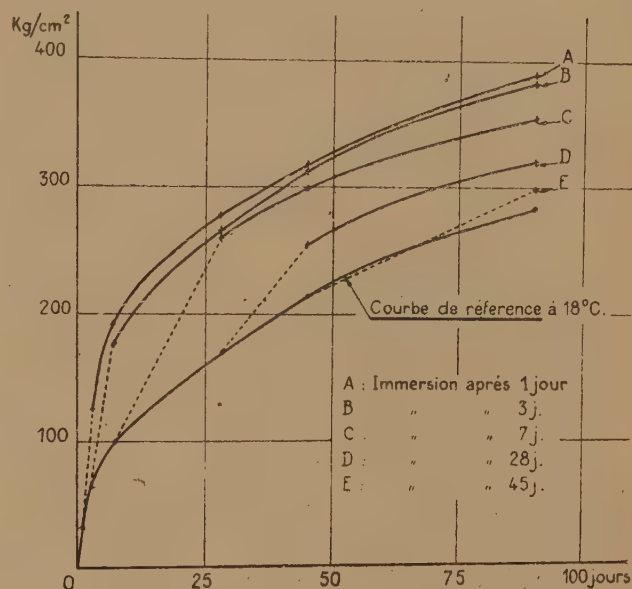


GRAPHIQUE C-I. — Chaux Tambour : conservation à 0° C.

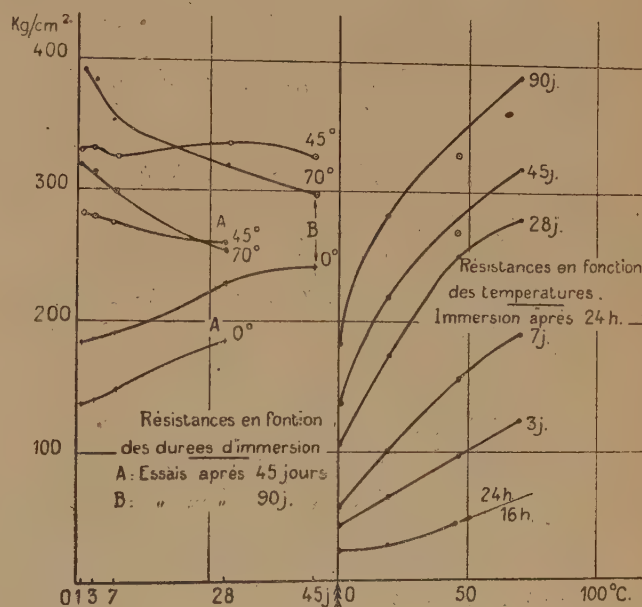


GRAPHIQUE C-II. — Chaux Tambour : conservation à 45° C.

Toutefois, les courbes de durcissement aux différentes températures ont une allure générale semblable. Le tableau XV donne les rapports des résistances à la compression aux différentes températures rapportées à celles obtenues à 18° C.



GRAPHIQUE C-III. — Chaux Tambour : conservation à 70° C.



GRAPHIQUE C-IV. — Chaux Tambour : Résistances en fonction des températures et des durées d'immersion.

TABLEAU XV.

AGE d'essai	IMMERSION milieu définitif après	RAPPORT DES CHARGES DE RUPTURE à celles obtenues à 18° C pour des températures de		
		0,5° C	45,5° C	69,5° C
jours				
1	16 h	0,76	1,46	
3	16 h	0,58	1,45	2,08
	24 h	0,68	1,49	1,92
7	16 h	0,57	1,54	
	24 h	0,61	1,60	1,98
	3 j	0,75	1,47	1,81
28	24 h	0,62	1,49	1,65
	3 j	0,66	1,48	1,58
	7 j	0,70	1,43	1,54
45	24 h	0,65	1,25	1,48
	3 j	0,64	1,30	1,46
	7 j	0,69	1,28	1,39
	28 j	0,86	1,21	1,19
90	24 h	0,65	1,17	1,37
	3 j	0,66	1,18	1,35
	7 j	0,67	1,15	1,25
	28 j	0,81	1,18	1,13
	45 j	0,86	1,16	1,05

1° Immersion dans le milieu définitif 24 h au maximum après la fabrication :

Le froid retarde le durcissement aux différentes périodes; à 0,5° C la résistance n'est que de 65 % de celle à 18° C.

La chaleur, au contraire, accélère ce durcissement, mais son action diminue avec le temps; les résistances passent de 1,5 à 1,2 fois celle à 18° C à la température de 45° C et de 2 à 1,4 fois à la température de 69,5° C.

2° Immersion dans le milieu définitif après des séjours supérieurs à 24 h dans l'eau à 18° C :

L'action retardatrice du froid et l'action accélératrice de la chaleur se font d'autant moins sentir que les éprouvettes sont restées plus longtemps à la température de 18° C. A 45° C cependant, l'action reste à peu près la même.

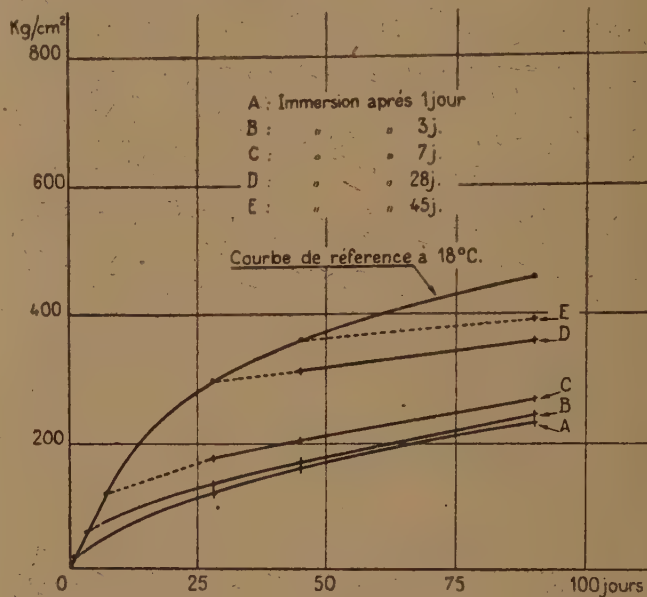
Conclusions :

La température ayant une influence notable sur la résistance à la compression de ce liant, il y a lieu d'en tenir compte dans la comparaison des résultats. En effet, un écart de 10° C au-dessous ou au-dessus de 18° C correspond à des variations dans la résistance de 20 à 30 % à 7 j et de 10 à 20 % à 90 j.

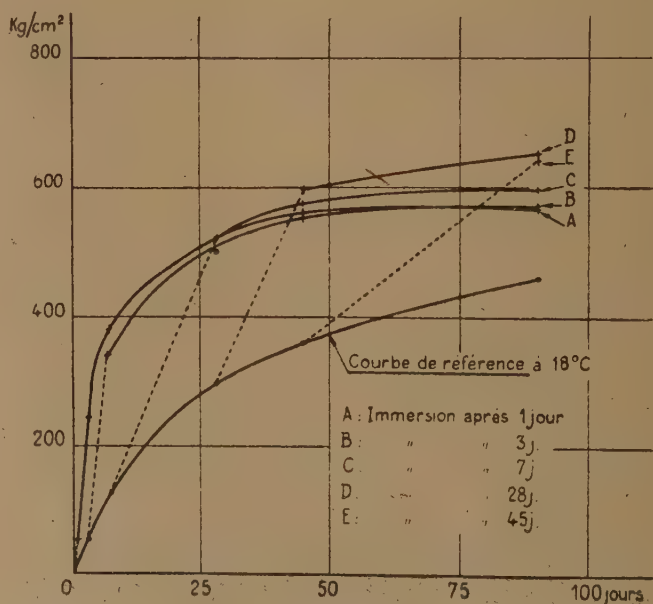
Comme pour le ciment portland, l'aspect du mortier après rupture est le même dans tous les cas.

D. — CIMENT DE LAITIER (pl. V, graphiques D-I, II, III et IV).

Les graphiques I à IV relatifs au ciment de laitier révèlent que le durcissement définitif n'est pas davantage atteint à 90 j; la résistance à la compression a augmenté de 28 % entre 45 et 90 j et de 80 % entre 90 j et 2 ans. Une courbe à échelle logarithmique (non reproduite) montre que, même à 2 ans, la résistance est encore croissante.

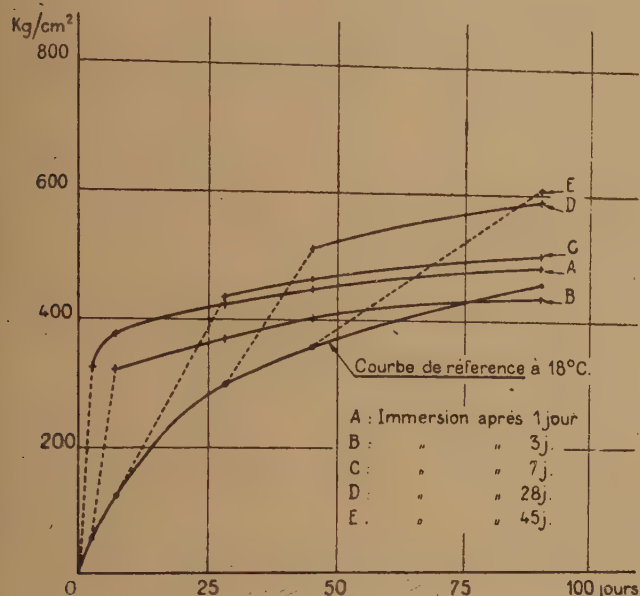


GRAPHIQUE D-I. — Ciment de laitier : conservation à 0° C.

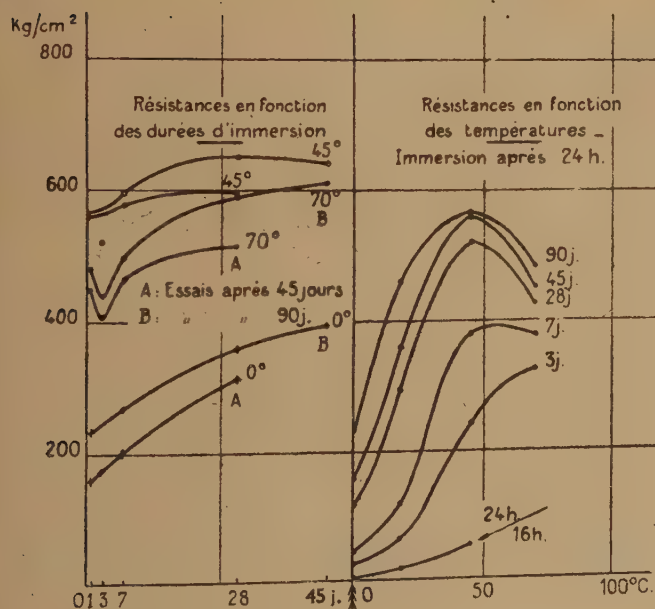


GRAPHIQUE D-II. — Ciment de laitier : conservation à 45° C.

Le tableau XVI donne les rapports des résistances à la compression aux différentes températures à celles obtenues à 18° C :



GRAPHIQUE D-III. — Ciment de laitier : conservation à 70° C.



GRAPHIQUE D-IV. — Ciment de laitier : Résistances en fonction des températures et des durées d'immersion.

TABLEAU XVI.

AGE d'essai	IMMERSION milieu définitif après	RAPPORT DES CHARGES DE RUPTURE à celles obtenues à 18° C pour des températures de		
		0,5° C	45,5° C	69,5° C
jours				
1	16 h	0,36	2,79	
3	16 h	0,36	3,96	6,18
	24 h	0,50	4,08	5,42
7	16 h	0,34	3,18	
	24 h	0,42	3,18	3,15
	3 j	0,63	2,79	2,70
28	24 h	0,41	1,69	1,46
	3 j	0,46	1,70	1,30
	7 j	0,59	1,75	1,47
45	24 h	0,44	1,56	1,26
	3 j	0,47	1,46	1,13
	7 j	0,56	1,61	1,29
	28 j	0,87	1,66	1,43
90	24 h	0,51	1,23	1,06
	3 j	0,53	1,26	0,96
	7 j	0,59	1,30	1,10
	28 j	0,78	1,42	1,29
	45 j	0,85	1,40	1,34

1° Immersion dans le milieu définitif 24 h au maximum après la fabrication :

Le froid retarde beaucoup le durcissement aux différentes périodes ; à 90 j la résistance à 0,5° C n'est que la moitié de celle à 18° C.

Par contre, la chaleur accélère énormément ce durcissement. Mais, à l'inverse de ce qui se produit pour la chaux, le graphique IV montre, dès 7 j d'âge, l'existence d'une température optimum qui doit se situer entre 45° et 70° C et probablement plus près de 45° C. Cette action accélératrice de la chaleur s'atténue avec le temps ; c'est ainsi que, par rapport à la résistance à 18° C, la résistance à 3 j est quatre fois plus grande à 45° C et six fois plus grande à 70° C, tandis qu'elle n'est plus élevée respectivement que de 20 % et de 6 % à 90 j.

2° Immersion dans le milieu définitif après des séjours supérieurs à 24 h dans l'eau à 18° C :

Ce liant ne se comporte pas comme la chaux, ni comme le Portland, lorsqu'on immerge les éprouvettes dans le milieu définitif après des temps supérieurs à 24 h ; les actions du froid et de la chaleur sont inverses.

L'action retardatrice du froid est d'autant plus faible que l'éprouvette est restée plus longtemps à 18° C ; à 90 j, la résistance passe de 50 % à 85 % de celle à 18° C. Par contre, la chaleur a d'autant plus d'action qu'elle a été appliquée moins longtemps ; ce phénomène se constate dès 28 j à 45° C et seulement à 45 j pour 70° C. Dans les premiers jours du durcissement on constate au contraire l'effet inverse.

Conclusions :

De même que pour la chaux, et avec encore plus d'acuité, le facteur température intervient dans la résistance du

ciment de laitier. Un écart de 10°C au-dessous ou au-dessus de 18°C provoque des variations de résistance pouvant atteindre 40 % à 28 j et même 50 % si on passe de 18° à 28°C à 7 j.

L'aspect de la cassure est le même à partir d'un certain âge, quelle que soit la température; le mortier a une teinte verte. Les éprouvettes plus jeunes à 0° et à 18°C ont une cassure terreuse ou de couleur café au lait, tandis qu'elles sont déjà vertes à 24 h à la température de 45°C et à 3 j à la température de 70°C . Il semble donc que la couleur verte accompagne l'accroissement de la résistance.

Conclusions du chapitre IV.

La température a une grosse influence sur certains liants hydrauliques; il y a donc lieu d'en tenir grand compte.

Si l'on veut déterminer la qualité d'un liant par ses propriétés mécaniques et, d'autre part, si l'on veut pouvoir comparer ses propres résultats à ceux des autres expérimentateurs, il faut maintenir les éprouvettes à une température constante normalisée.

Si, par contre, on recherche une plus grande résistance dans le minimum de temps, on pourra accélérer le durcissement par un emploi judicieux de la chaleur, quand c'est possible. Il faut toutefois excepter le ciment fondu, à moins que l'on ne recherche précisément à l'amener dans sa forme stable pour éviter des modifications ultérieures dues à la chaleur. Il perdrait ses qualités de ciment à haute résistance, mais il garderait sans doute, ce qui serait à vérifier, ses qualités de liant insensible aux eaux séléniteuses.

CHAPITRE V

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR L'ÉTAT CRISTALLIN DES LIANTS HYDRAULIQUES

Parallèlement à l'étude mécanique, nous avons procédé à la détermination de la constitution cristalline des mêmes liants par l'analyse aux rayons X suivant la méthode de DEBYE-SCHERRER.

Nous décrirons successivement l'appareillage utilisé pour la prise des spectrogrammes, le mode de prélèvement des éprouvettes, enfin les résultats obtenus.

Description du matériel (fig. 10).

Les prises de spectrogrammes ont été faites à l'aide du tube à rayons X démontable, construit par la Compagnie Générale de Radiologie (C. G. R.). Ce tube, en partie métallique, qui peut recevoir des anticathodes de cuivre ou de tungstène, est à filament interchangeable. Il comporte quatre fenêtres latérales dont l'axe fait un angle de 70° avec l'axe du tube et une cinquième fenêtre frontale, ayant son axe perpendiculaire à l'axe du tube.

Le vide est produit par trois pompes successives, construction C. G. R. : une pompe à palettes réalisant une pression d'environ 5 mm de mercure et deux pompes secondaires à condensation, l'une à vapeur de mercure, l'autre à vapeur d'huile, produisant en définitive une pression de l'ordre de 10^{-6} mm de mercure.

L'alimentation du tube est assurée en courant continu suivant le montage classique comportant deux kénotrons et deux condensateurs (schéma, fig. 11, montage connu sous le nom de « Tension constante »).

La tension continue ainsi obtenue présente une fluctuation en dents de scie de l'ordre de 5 %; sa valeur efficace est mesurée par un voltmètre électrostatique ABRAHAM-VILLARD, V, branché aux bornes du tube.

Le courant débité par le tube à rayons X est mesuré par un milliampèremètre à cadre mobile, mA, qui donne



FIG. 10. — Appareil à rayons X.

la valeur moyenne. L'installation comporte enfin deux résistances bobinées de sécurité de 200 000 ohms, R, branchées sur chacun des pôles du tube.

Les fenêtres latérales ont été obturées par des bouchons d'acier percés d'un trou circulaire de 7 mm environ de diamètre sur lequel est mastiquée, à la picéine, une feuille de nickel de 2/100 mm d'épaisseur servant de filtre aux rayons X. Un porte-film circulaire de 13 cm de diamètre, comportant un limiteur, est fixé à chaque fenêtre et reçoit au centre du cercle la poudre à analyser. Un dispositif de réglage permet le centrage de l'échantillon en examen sur le faisceau de rayons X.

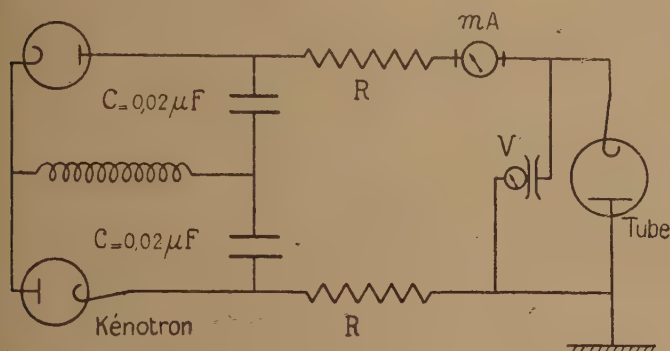


FIG. 11. — Schéma du poste à rayons X.

Le film photographique spécial Lumière est utilisé sous forme de bandes de 1,5 cm de largeur et 20,5 cm de longueur.

Tous nos essais ont été faits au régime de 40 KV-20 mA; le rayonnement utilisé était celui de la raie K_{α} du cuivre (anticathode de cuivre).

Prélèvement des éprouvettes :

Lors des essais mécaniques des éprouvettes fabriquées avec les liants soumis à diverses températures, nous avons conservé, dans chaque série, une éprouvette cassée servant de témoin. Du cœur de ces témoins, nous avons extrait le liant, puis, après un léger broyage au mortier d'agate, nous avons pu, par tamisage au tamis n° 200, séparer le sable du liant. Cette séparation s'est avérée très facile dans presque tous les cas, sauf, ainsi que nous le verrons plus loin, dans celui du ciment fondu conservé à des températures inférieures à 45° C.

Des tubes en verre spécial perméable aux rayons X, de 0,5 à 1 mm de diamètre, étaient remplis avec la poudre ainsi obtenue, puis fixés sur la platine du porte-film avec de la cire à modeler.

Nous avons, de cette façon, effectué cent quatre-vingt-deux spectrogrammes avec les quatre liants, ciment portland, ciment fondu, chaux hydraulique et ciment de laitier et quelques produits servant de référence, tels que NaCl, CaO, Ca (OH)², CO²Ca, sable de Leucate pulvérisé, aluminat tricalcique hydraté cubique, etc...

Résultats. I. — Spectrogrammes préliminaires :

Notre premier souci a d'abord été de vérifier l'identité des spectrogrammes obtenus aux quatre fenêtres latérales. Dans ce but, quatre tubes remplis avec la même substance (NaCl) ont été placés sur les quatre fenêtres du poste. Les spectrogrammes confrontés étaient absolument identiques; le même résultat a été obtenu avec l'aluminat hydraté cubique.

Un pied à coulisse spécial à pointes nous a servi à mesurer les distances « d » entre les raies et le centre et nous avons calculé l'équidistance « e » des plans réticulaires par la formule :

$$e = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

où :

$$\lambda = K_{\alpha} \text{ Cu} = 1,539 \cdot 10^{-8} \text{ cm},$$

$$2\theta (\text{en } r) = \frac{d}{R} \quad \text{avec} \quad 2R = 13 \text{ cm},$$

d'où :

$$\theta^{\circ} = \frac{d}{13} \cdot \frac{360}{6,28} = 4,41d \quad (d \text{ en cm}).$$

Pour faciliter le dépouillement de nos films, nous avons tracé la courbe des équidistances des plans réticulaires en fonction des distances des raies de diffraction au centre.

Les tableaux XVII à XXI font connaître, pour chacun des produits indiqués, les distances « d », en centimètres, des raies au centre avec indication de leur intensité (Tf = très faible, f = faible, m = moyenne, F = forte, TF = très forte), les équidistances « e », en Å, des plans réticulaires, calculés d'après nos résultats, et les mêmes valeurs fournies par divers auteurs. En ce qui concerne l'intensité, HARRINGTON l'indique par des chiffres compris entre 0 et 10.

La reproduction de ces films figure en annexe (pl. VII); il y a lieu de noter toutefois que les raies y sont moins nettement visibles que sur les films originaux qui sont observés par transparence.

TABLEAU XVII. — NaCl.

FILM N° 123		MEHREL	
d_{cm}	$e \text{ Å}$	Å	
3,08 f	3,28	3,32 f	Chiffres réunis par une accolade : Distance intérieure et extérieure d'une raie large.
3,52	2,83	2,81 F	
3,61 TF			
5,08	2,00	1,99 F	
5,16 F			
6,08 f	1,70	1,69 f	
6,39 m	1,62	1,62 m	
7,48 m	1,41	1,40 m	
8,26 f	1,29	1,29 f	
8,50 m	1,26	1,26 m	
9,49 m	1,15	1,15 m	
10,21 Tf	1,09	1,08 f	
11,40 f	1,00	0,99 m	

L'emploi de NaCl a permis de confirmer la constante de l'appareillage. On constate un accord satisfaisant entre la valeur expérimentale trouvée et les chiffres donnés par MEHMEL (14).

Pour vérifier leur non-altération et avoir des données utiles pour nos recherches, nous avons effectué les radiogrammes de la chaux vive et de la chaux éteinte employées à la constitution de l'eau de chaux de conservation des éprouvettes :

TABLEAU XVIII. — CaO.

FILM N° 132		HARRINGTON (8)		BROWNMILLER (3)
d_{cm}	$e \text{ Å}$	Å		Å
3,70 m	2,74	2,77	7	2,76 m
4,31 F	2,36	2,40	10	2,39 TF
6,17 F	1,68	1,70	10	1,69 F
7,33 m	1,43	1,45	8	1,44 m
7,69 m	1,37	1,39	8	1,38 m
9,05 f	1,20	1,20	6	1,20 f
10,04 m	1,10	1,10	6	1,10 f
10,37 F	1,07	1,07	8	1,07 m
				

Des radiogrammes de CO^3Ca et du sable de Leucate ont également été effectués.

TABLEAU XX. — SABLE DE LEUCATE.

FILM N° 148		MEHMEL (Quartz)	
d_{cm}	$e \text{ Å}$	Å	
2,27 } F	4,35	4,26 m	
2,37 }			
2,91 }			
3,04 } TF	3,39	3,39 TF	
4,12 m			
4,44 m			
4,79 m	2,47	2,45 m	
5,16 m	2,29	2,26 m	
5,65 F	2,13	2,12 m	
6,17 m	1,99	1,97 m à F	
6,58 Tf	1,82	1,82 F	
6,74 F	1,68	1,66 m	
7,21 f	1,58	1,60 Tf	
7,32 Tf	1,54	1,54 F	
7,65 F	1,46	1,44 f	
8,27 m	1,43	1,41 Tf	
8,52 m	1,38	1,37 TF	
8,75 f	1,29	1,28 m à F	
9,00 m	1,26	1,25 m	
9,16 m	1,23	1,22 m à f	
9,45 m	1,20	1,19 m à F	
9,88 Tf	1,18	1,18 m à F	
10,24 m	1,15	1,15 m	
10,46 Tf	1,12	1,11 Tf	
10,68 m	1,09	1,08 m à F	
10,84 m	1,07	1,06 Tf	
11,13 m	1,05	1,04 m	
	1,04	1,03 m	
	1,02	1,01 m	

TABLEAU XIX. — $\text{Ca}(\text{OH})^2$.

FILM N° 133		HARRINGTON (8)	
d_{cm}	$e \text{ Å}$	Å	
2,10 f	4,80		
3,30 f	3,06	3,11	4
3,90 TF	2,60	2,63	10
5,37 F	1,91	1,93	8
5,78 F	1,78	1,79	9
6,17 F	1,68	1,68	6
6,74 Tf	1,54	1,55	1
7,12 m	1,47	1,48	6
7,30 m	1,44	1,45	5
8,15 m	1,31	1,31	5
8,97 Tf	1,21		
9,27 Tf	1,17	1,17	0,5
9,60 m	1,14	1,14	4
9,75 Tf	1,13	1,13	1
10,53 m	1,06	1,06	4
10,85 f	1,04	1,04	2
11,16 m	1,01	1,01	2

TABLEAU XXI. — CO^3Ca .

FILM N° 59		HARRINGTON (8)		MEHMEL (14)
d_{cm}	$e \text{ Å}$	Å		Å
2,68 f	3,74			4,28 f
3,08 f	3,28			3,86 m
3,27 } TF	3,01	3,03	10	3,40 m
3,43 }				3,06 TF
4,15 m				2,52 m
4,54 m	2,45	2,49	4	2,31 m à F
4,96 m	2,25	2,28	6	2,11 m à F
5,45 F	2,07	2,10	6	1,93 F
5,57 F	1,89	1,92	8	1,89 F
	1,86	1,87	7	1,81 f
				1,69 f
6,49 f	1,60	1,60	5	1,62 m
6,59 m	1,58			1,53 m
6,95 m	1,51	1,52	5	1,49 f
7,22 f	1,45	1,44	4	1,45 f
7,41 m	1,42			
7,53 m	1,40			
7,92 Tf	1,34	1,35	1	
8,03 f	1,32			1,31 f
8,33 m	1,28	1,29	1	
8,42 Tf	1,27			
8,70 Tf	1,24	1,23	2	
8,83 f	1,22			
9,32 m	1,17	1,18	2	1,18 f
9,56 m	1,15	1,15	3	1,16 f
9,68 f	1,13			1,15 f
10,61 Tf	1,05			1,05 m
10,81 m	1,04	1,04	2	
10,96 Tf	1,03			
		1,01	2	1,01 m

Pour la plupart des corps on trouve un bon accord; toutefois l'écart est plus grand pour les raies proches du centre que pour celles qui en sont éloignées.

Ce fait est particulièrement marqué dans le cas de CO^3Ca .

II. — Étude des liants :

En principe, le mot « clinker » désigne la masse granuleuse sortant du four et on réserve le mot « ciment » à cette même substance broyée telle qu'elle est livrée au commerce. Pour éviter toute confusion entre le ciment, avant et après hydratation, nous désignerons, comme le font certains auteurs, sous le nom de clinker, le ciment vierge.

A. — CIMENT PORTLAND.

Nous avons soumis aux rayons X la poudre de clinker et la poudre provenant des éprouvettes rompues à la

compression après conservation aux quatre températures d'étude et pour des durcissements échelonnés entre 24 h et 90 j et même 4 ans.

L'examen des divers radiogrammes conduit aux conclusions suivantes :

Clinker : Le ciment utilisé a une constitution cristalline (6), ainsi que l'ont démontré divers expérimentateurs, entre autres BROWNMILLER et BOGUE (3).

Le tableau XXII donne les résultats relatifs au clinker (film n° 182) et les distances réticulaires indiquées par BROWNMILLER et BOGUE, pour les composés : 3 CaO SiO_2 (C^3S), $\beta 2 \text{ CaO SiO}_2$ (C^2S), $3 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3$ (C^3A) et MgO .

Si on compare tout d'abord les chiffres obtenus et ceux de la chaux (p. 24, tabl. XVIII), on constate qu'il n'y a pas de chaux libre dans notre clinker ou, tout au moins, que s'il y en a, elle est en proportion non décelable par la méthode des « poudres ».

La comparaison avec les spectres des divers composés montre la présence de MgO . Mais les deux raies se révèlent

TABLEAU XXII.

FILM 182 (CLINKER)		C^3S	$\beta\text{C}^2\text{S}$	C^3A	MgO	FILM N° 93	
d_{cm}	$e\text{\AA}$					d_{cm}	$e\text{\AA}$
3,34 F	3,03	3,02 s 2,940 w				3,06 f 3,37 F	3,29 3,00
3,61 } F	2,78	2,750 ssb	2,750 ssb			3,67 Tf	2,76
3,67 }						3,74 f	2,71
3,88 F	2,62	2,600 s	2,610 s	2,690 ss		3,91 f 4,11 Tf	2,60 2,48
4,16 Tf	2,44		2,440 m 2,400 m				
4,40 Tf	2,32	2,320 m	2,278 m			4,51 m	2,26
4,67 m	2,18	2,178 m	2,182 s			4,71 f	2,17
4,87 Tf	2,10				2,100 ss		
4,99 Tf	2,05		2,030 mb			4,93 m	2,08
5,17 Tf	1,98	1,975 m	1,980 m			5,00 Tf	2,05
5,32 m	1,92	1,932 m	1,895 mb	1,905 s		5,22 Tf	1,96
5,63 Tf	1,83	1,825 w	1,800 m			5,38 m	1,90
5,84 m	1,76	1,762 s				5,52 m	1,86
6,39 1/2 m	1,62	1,627 s				5,70 Tf	1,81
6,78 Tf	1,54	1,542 mb		1,555 ss		5,80 Tf	1,78
7,04 m	1,49	1,487 s				6,19 Tf	1,67
7,21 f	1,46	1,458 w		1,346 m	1,486 ss	6,43 f	1,61
						6,49 f	1,60
						6,81 f	1,54
						6,89 f	1,51
						7,07 Tf	1,48
						7,27 Tf	1,44
						8,26 Tf	1,29
9,05 f	1,20	1,198 w 1,162 wb				9,23 Tf	1,18
9,70 f	1,13	1,132 wb					
10,19 f	1,09	1,090 wb				10,51 Tf	1,06
						10,73 Tf	1,04

dans le clinker en étude, avec les qualificatifs « très faible » et « moyen » au lieu de « très fort » chez BROWNMILLER. Le composé $3 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3$ ne se manifeste pas dans le radiogramme; par contre, on identifie très nettement les composés 3 CaO SiO_2 et 2 CaO SiO_2 .

Nos conclusions concordent avec celles des auteurs précités, relativement à la composition du ciment portland.

A titre de renseignement complémentaire, voici l'analyse chimique de ce clinker et sa composition probable (1) :

SiO_2	22,00 %	CaCO_3	2,60 %
Al_2O_3	6,85	CaSO_4	3,35
Fe_2O_3	3,27	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Al}_2\text{O}_3 4 \text{ CaO}$	9,95
CaO	63,20	$\text{Al}_2\text{O}_3 3 \text{ CaO}$	12,55
MgO	1,57	$\text{SiO}_2 2 \text{ CaO (MgO)}$	35,85
SO_3	1,97	$\text{SiO}_2 3 \text{ CaO}$	35,85
CO_2	1,14		

Ciment après durcissement. — Déjà après 24 h de durcissement dans l'eau à 0°C , on constate une modification du spectrogramme. La raie $2,62 \text{ \AA}$ s'estompe; après trois jours, c'est la raie $2,78 \text{ \AA}$ qui s'affaiblit à son tour; il y a apparition de raies nouvelles ou accentuation de certaines raies faibles du clinker. Le tableau XXII donne les relevés effectués sur le film n° 93 — liant à 7 j d'âge conservé à 0°C . A 18° ou à 45°C , les spectrogrammes sont identiques à celui du ciment conservé à 0°C .

La transformation s'effectue progressivement au cours du durcissement; par rapport au spectre à 7 j, on constate à 90 j, quelle que soit la température, une accentuation très nette de la raie $3,29 \text{ \AA}$ qui devient forte et l'apparition d'une raie $3,15 \text{ \AA}$ ainsi que l'atténuation ou l'accentuation d'autres raies. Comparé avec le spectrogramme du clinker, celui du ciment à 90 j se révèle tout différent.

On peut donc conclure que le durcissement s'accompagne d'une modification de la composition cristalline. Ne possédant pas de données concernant les composés hydratés des liants hydrauliques, il ne nous a pas été possible d'identifier les nouveaux composants.

D'autre part, de l'identité à chaque période de durcissement des spectrogrammes relevés pour les différentes températures de conservation des éprouvettes, on peut conclure que la chaleur qui accélère le durcissement ne modifie pas la composition cristalline.

B. — CIMENT FONDU LAFARGE.

Clinker. — Nous avons examiné trois livraisons différentes de ce ciment « fondu », celle du 22 décembre 1938 avec laquelle nous avons confectionné les éprouvettes cubiques pour essais à la compression (tableau VII, en annexe pl. III), celle du 8 mars 1939 (tableau XIII, en annexe, pl. VI), enfin, celle du mois de juin 1939 avec laquelle nous avons étudié le phénomène de la prise aux rayons X.

Tous ces spectrogrammes sont identiques; ils comportent des raies, donc ce ciment contient certains éléments

cristallins. On n'y décèle ni chaux libre ni aucun des éléments cristallins du ciment portland. Le tableau XXIII, film n° 124 donne les constantes « d » et « e » de l'un de ces spectrogrammes.

TABLEAU XXIII. — CLINKER « FONDU ».

FILM N° 124	
d_{cm}	$\lambda \text{ \AA}$
3,15 Tf	3,2
3,29 f	3,07
3,40 F	2,97
3,50 m	2,89
3,64 m	2,79
3,75 f	2,70
3,82 f	2,66
4,01 m	2,54
4,21 f	2,42
4,35 f	2,34
4,50 Tf	2,27
4,65 f	2,19
4,73 m	2,16
5,05 Tf	2,03
5,32 F	1,92
6,58 m	1,58
6,70 m	1,56
6,83 F	1,53
7,03 Tf	1,49
7,16 f	1,47
....	

Ciment après durcissement. — De même que pour les résistances mécaniques (p. 16, chap. IV), il y a, entre les spectrogrammes, des différences très nettes suivant qu'ils sont relatifs à des éprouvettes conservées à froid ou à chaud.

a) *Conservation à $0,5^\circ \text{C}$ et à 18°C .* — On constate, quel que soit l'âge de l'éprouvette, une identité absolue des spectrogrammes à $0,5^\circ \text{C}$ et à 18°C , ce qui n'a rien de surprenant puisque nous avons vu (chap. IV, p. 16) que les résistances mécaniques à ces deux températures sont sensiblement égales.

A 5 h d'âge, les éprouvettes donnent des spectrogrammes identiques à ceux du clinker. Mais, à partir de 8 h d'âge, il y a atténuation des trois raies $2,54 \text{ \AA}$, $2,42 \text{ \AA}$ et $1,58 \text{ \AA}$. Par contre, de nombreux « pointillés » font leur apparition; ils sont dus à la présence de quartz en éléments relativement gros. Dans le seul cas du ciment fondu, il nous a été impossible de séparer complètement le sable du liant. La rupture extrêmement brutale des éprouvettes, provoquant la pulvérisation des matériaux constituants, empêche l'élimination du sable par tamisage. Mais il est facile, en rapprochant le spectre du sable de Leucate (film n° 148, pl. VII) de celui des éprouvettes aux différents âges, d'éliminer ce qui est dû au quartz. On constate alors qu'il ne reste plus, pour le liant, que quelques raies du clinker qui semblent s'estomper à 45 et à 90 j.

Pour nous affranchir d'ailleurs du sable, nous avons confectionné des éprouvettes de pâte pure que nous avons conservées, d'une part à l'air humide et d'autre part

(1) Ces renseignements ont été aimablement fournis par M. GUNTZ, professeur de Chimie appliquée à la Faculté des Sciences d'Alger.

dans de l'eau de pluie à 18° C. Des spectrogrammes ont été établis après 24 h, 5 j, 16 j et 4 ans; ils offrent tous le même aspect que celui des éprouvettes de mortier, défalcation faite des raies du sable.

D'autre part, dans le but de déceler une modification de la composition cristalline, lors de la prise, nous avons introduit dans les tubes destinés à l'examen aux rayons X, la pâte, immédiatement après le gâchage et, d'heure en heure, nous avons relevé des radiogrammes. Jusqu'à 6 h d'âge, les spectrogrammes étaient identiques à ceux du clinker, puis les clichés sont devenus de moins en moins nets mais en montrant une tendance très marquée à la disparition des raies, comme dans le cas des éprouvettes.

Donc, tout se passe, même après quatre ans de conservation, comme si le durcissement du ciment fondu était accompagné d'une amorphisation et cela, quels que soient le mode et la durée de conservation des éprouvettes (air humide, eau de pluie ou eau saturée de chaux — 8 h à 4 ans).

TABLEAU XXIV. — $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

FILM N° 136	
d_{cm}	$e\text{\AA}$
1,25 F	dans Halo
1,18 } TF	5,30
1,99 }	
2,22 } F	4,45
2,28 }	
3,00 F	3,35
3,20 F	3,12
3,61 TF	2,79
3,77 Tf	2,65
3,96 f	2,56
4,11 f	2,47
4,42 TF	2,30
5,01 TF	2,05
5,15 Tf	1,99
5,69 f	1,81
5,80 Tf	1,78
5,83 F	1,75
6,05 m	1,71
6,17 F	1,68
6,52 m	1,60
6,63 m	1,57
7,09 TTf	1,48
7,52 m	1,41
7,72 f	1,37
7,84 TTf	1,36
7,95 f	1,34
8,26 f	1,30
8,46 f	1,27
8,67 TTf	1,24
9,06 m	1,19
9,34 m	1,17
9,44 TTf	1,15
9,54 m	1,15
9,83 m	1,12
9,92 Tf	1,11
10,23 f	1,09
10,7 TTf	1,05
11,1 m	1,02

b) *Conservation à 45° C et à 70° C.* — Un séjour de 3 h seulement dans de l'eau à 70° C modifie complètement la composition cristalline du liant immergé à 5 h d'âge. Les raies sont nettes et on n'y trouve plus de pointillés dus au sable. Quels que soient l'âge des éprouvettes et la nature de l'eau de conservation, eau de pluie ou eau de chaux, les spectrogrammes des poudres provenant des éprouvettes maintenues à 45° C et à 70° C, sont tous identiques à ceux obtenus à 8 h d'âge.

• Nous croyons donc pouvoir conclure que la baisse notable de résistance mécanique (p. 17, chap. iv) est due à la modification de la composition cristalline. Nous avons cherché à établir cette constitution nouvelle. M. LAFUMA ayant émis l'hypothèse que ce nouveau constituant devait être l'aluminate tricalcique hydraté cubique $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nous avons, sur ses indications, fabriqué ce produit suivant la méthode indiquée ci-dessous, pour en prendre le spectrogramme :

Après agitation pendant 1 h de 20 g de ciment fondu dans 1 l d'eau distillée, 685 cm³ de la solution filtrée ont été mélangés à 1 370 cm³ d'eau de chaux saturée. Après un repos, la moitié des eaux mères ayant été décantée et remplacée par de l'eau de chaux, le mélange précipité-lieur a été chauffé pendant 3 h entre 90° et 100° C.

Le tableau XXIV comporte les relevés effectués sur un des spectrogrammes de ce produit (film n° 136).

Dans les spectrogrammes provenant des éprouvettes de mortier conservées à chaud, on retrouve toutes les raies de cet aluminat, sauf le halo central, plus deux raies 2,16 Å et 1,53 Å dues sans doute à un autre constituant que nous n'avons pu identifier. Le film n° 76 illustre assez bien cette concordance.

Il en est de même pour la pâte pure conservée dans l'eau à 70° C pendant 3 h après un séjour de 16 h à 18° C.

C. — CHAUX HYDRAULIQUE.

Clinker : Le clinker est cristallisé. (Film n° 92, tabl. XXV.)

Le spectrogramme du clinker est constitué par des raies floues dans lesquelles on discerne toutes les raies de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (voir film n° 133, pl. VII); par contre, on n'y décèle pas de chaux libre. Les raies supplémentaires semblent être dues au Béta-silicate bicalcique.

Chaux après durcissement. — Après 24 h d'âge, on constate dans les spectres des éprouvettes conservées à 0,5° C ou à 18° C, une légère modification qui va en s'accroissant dans le temps. La transformation est accélérée par la chaleur et c'est ainsi qu'à 7 j on obtient, pour des éprouvettes conservées à 45° C, un film très différent de celui du clinker (film n° 53, tabl. XXV, pl. VII).

Comme pour le ciment Portland, la chaleur accélère la transformation cristalline, mais ne la modifie pas.

TABLEAU XXV. — CHAUX TAMBOUR C.

CLINKER FILM N° 92		FILM N° 53	
$d_{\text{сгд}}$	e°	$d_{\text{сгд}}$	e°
2,10 f	4,80	2,61 TTf	3,85
3,04 f	3,32	2,83 Tf	3,55
3,27 m	3,12	3,04 F	3,32
3,37 m	3,0	3,33 Tf	3,04
3,66 F	2,77	3,65 TTf	2,76
3,90 F	2,61	3,72 F	2,73
4,17 TTf	2,43	3,88 f	2,62
4,48 Tf	2,27	4,08 m	2,48
4,69 m	2,17	4,47 1/2 F	2,28
5,03 Tf	2,04	4,66 TTf	2,19
5,35 f	1,91	4,81 TTf	2,13
5,77 f	1,79	4,89 m	2,09
5,88 f	1,75	4,98 m	2,06
6,15 f	1,68	5,18 f	2,01
6,42 f	1,62	5,33 m	1,92
6,77 f	1,54	5,48 m	1,87
7,07 Tf	1,48	5,67 m	1,81
8,06 Tf	1,32	5,95 TTf	1,74
....		6,29 Tf	1,65
		6,50 f	1,60
		6,77 Tf	1,54
		6,88 f	1,52
		7,09 Tf	1,48
		7,28 Tf	1,44
		7,68 f	1,37
		8,32 f	1,29
			

TABLEAU XXVI. — CIMENT DE LAITIER D.

CLINKER FILM N° 100		FILM N° 189	
d_{cm}	$c \text{ \AA}$	d_{cm}	$c \text{ \AA}$
3,39 f	2,99	2,85 f	3,53
3,70 1/2 m	2,74	3,33 F	3,06
3,93 1/2 m	2,59	3,74 m	2,71
4,72 m	2,16	4,12 m	2,46
5,17 Tf	1,98	4,48 f	2,27
5,33 f	1,92	5,00 f	2,05
5,89 m	1,75	5,26 m	1,95
6,44 Tf	1,61	5,38 m	1,91
6,81 TTf	1,53	5,50 m	1,87
7,09 m	1,48	6,02 Tf	1,72
7,24 Tf	1,45	6,32 f	1,64
		6,56 f	1,59
		6,84 f	1,51
		7,16 f	1,47
		7,49 f	1,40
		7,94 f	1,33

Pointés des raies autres que celles du sable de Leucate

D. — CIMENT DE LAITIER.

Clinker : Le clinker du ciment de laitier, comme celui des autres ciments étudiés, est cristallisé; le film obtenu (n° 100, tableau XXVI) présente un petit nombre de raies peu intenses qu'on retrouve dans le spectre du clinker de Portland. Il ne semble pas qu'il subsiste de chaux libre.

Ciment après durcissement : A 24 h, on observe déjà une modification très nette du radiogramme pour les éprouvettes conservées à 18° C et à chaud. On obtient un stade intermédiaire pour les éprouvettes conservées à 0° C.

Les raies vont en s'accroissant, en même temps qu'apparaissent d'autres raies ou des « pointillés » dus au sable de Leucate. Le tableau XXVI donne les constantes relevées sur le film n° 189 effectué sur de la poudre provenant d'une éprouvette ayant 90 j d'âge et conservée à 45° C, décoloration faite des raies dues au sable qui ne s'était pas trouvé éliminé par tamisage.

Les radiogrammes des éprouvettes ayant le même âge, mais conservées à froid, sont identiques au n° 189.

Conclusions du chapitre.

Du dépouillement des cent quatre-vingt-deux spectrogrammes effectués avec de la poudre provenant des quatre ciments en étude, ciment portland, ciment « fondu », chaux et ciment de laitier et de quelques produits accessoires, on peut tirer les conclusions suivantes :

1° Tous les clinkers étudiés sont cristallisés.

2° Lors du durcissement des éprouvettes provenant des trois liants autres que le « fondu », on constate dans les radiogrammes la disparition des raies du clinker et l'apparition d'autres raies indiquant une modification de la composition cristalline.

3° La vitesse de formation des nouveaux cristaux varie dans le même sens que la température, pour ces trois mêmes liants. Mais, après 7 j environ, cette action cesse de se faire sentir et tous les radiogrammes deviennent identiques pour un même liant aux différentes températures. Ils n'éprouvent plus, en général, que de légers changements en fonction du temps. Il semble donc que la cristallisation, une fois amorcée, se poursuive et que l'accroissement de résistance mécanique soit dû simplement à une augmentation du nombre et de la taille des cristaux ou à une modification de leur enchevêtrement ou de leurs positions relatives.

4° Pour le « fondu » LAFARGE, il y a deux cas à considérer :

a) *Conservation à 0,5° C et à 18° C.* — Le durcissement est accompagné d'une amorphisation qui commence à se manifester, aux deux températures, 8 h après le gâchage et quel que soit le mode de conservation (air humide, eau de pluie ou eau saturée de chaux) et se poursuit même après 4 ans.

b) *Conservation à 45° C et à 70° C.* — Un séjour de 3 h seulement dans de l'eau à 70° C modifie la constitution cristalline du ciment « fondu ». Les raies du clinker disparaissent et font place à d'autres raies très nettes que l'on peut attribuer à la formation d'aluminate tricalcique hydraté cubique et d'un autre composé que nous n'avons pu identifier. Ce phénomène s'obtient, quels que soient l'âge de l'éprouvette et la nature de l'eau de conservation (eau de pluie ou eau de chaux).

RÉSUMÉ — CONCLUSIONS

Nos recherches ont consisté à mettre en évidence l'effet de la température sur la résistance et l'état cristallin de liants hydrauliques de qualités différentes. Mais l'expérience et nos essais ayant montré l'influence considérable du coefficient personnel dans la fabrication des éprouvettes, nous avons tout d'abord cherché à éliminer le « gâcheur. »

Et c'est ainsi que nous avons été conduite à mettre au point un matériel entièrement mécanique comprenant une bétonnière-malaxeuse et un girateur muni d'un distributeur automatique capable de fabriquer, en une seule opération, six cubes de mortier de 5 cm d'arête.

La précision des résultats des essais à la compression est de l'ordre de 3 %, compte tenu des petites imperfections que comporte encore le matériel. Il faut noter, par contre, que les machines d'essai sont d'excellente fabrication et en parfait état de fonctionnement.

En ce qui concerne l'influence de la température, des éprouvettes, fabriquées uniformément à 18° C, ont été étudiées à 0° C, 18° C, 45° C et 70° C. Les immersions dans le milieu définitif (18° C étant la température de référence) ont eu lieu au bout de temps variant entre 5 h et 45 j et les essais à la compression à des âges s'étageant de 8 h à 90 j et 2 ans.

Après rupture, de la poudre a été extraite des éprouvettes pour examen aux rayons X par la méthode de DEBYE-SCHERRER dans le but de déceler une correspondance possible entre la résistance mécanique, d'une part, et la constitution cristalline, d'autre part.

Les résultats obtenus avec un ciment portland, un ciment alumineux (fondu LAFARGE), une chaux hydraulique et un ciment de laitier, sont condensés ci-dessous :

1° Résistance mécanique :

Pour le ciment portland, la chaux et le ciment de laitier, une élévation de température accélère le durcissement, tandis que le froid le retarde; ces effets sont plus ou moins importants suivant le liant, la durée d'immersion dans le milieu définitif et l'âge de l'éprouvette.

Pour le ciment « fondu », alors que le froid a peu d'action, la chaleur amène une baisse de résistance de l'ordre de 50 à 60 % tandis que la couleur du mortier passe du gris au chocolat.

2° Constitution cristalline :

A ce point de vue également, il faut séparer le « fondu » des autres liants. Pour ceux-ci, la prise, puis le durcissement s'accompagnent d'un changement dans le spectre de rayons X, modification accélérée, au moins au début, par la chaleur.

Pour le ciment « fondu », l'état de la substance, de cristallin qu'il était dans le clinker, tend vers l'amorphisation dans les éprouvettes conservées à 0° C et à 18° C. Pour celles qui ont été conservées à 45° C et à 70° C, la baisse très rapide de résistance mécanique s'accompagne d'une modification immédiate (qui semble définitive) de la constitution cristalline.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. BIED. — Recherches industrielles sur les chaux, ciments et mortiers. Dunod, 1926.
2. J. BOLOMEY. — Durcissement des bétons. *Travaux*, n° 33, 1935, p. 384.
3. L. T. BROWN MILLER et R. H. BOGUE. — The X-Ray method applied to a study of the constitution of Portland cement. *American Journal of Science*, t. XX, 1930, p. 241.
4. COMMISSION DES MÉTHODES D'ESSAI DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, 1^{re} session, t. I, p. 295, 1894.
5. E. COUILLAUD. — Au sujet des essais physiques des ciments. Note aux C. R., t. 206, 1938, p. 985.
6. E. COUILLAUD. — Sur l'étude radiographique de l'évolution des ciments. Note aux C. R., t. 209, 1939, p. 397.
7. R. FÉRET. — Recherches sur les ciments alumineux. P. V., 1927. Association franco-belge pour l'essai des Matériaux.
8. E. A. HARRINGTON. — X-Ray diffraction measurement on some of the pure compounds concerned in the study of Portland cement. *American Journal of Science*, t. XIII, 1927, p. 467.
9. H. LAFUMA. — Recherches sur les aluminates de calcium et sur leurs combinaisons avec le chlorure et le sulfate de calcium. *Thèse*, 1925 et 1932.
10. H. LAFUMA. — Zéolites et liants hydrauliques. *Revue des Matériaux de Construction*, n° 256-257, 1931.
11. H. LAFUMA. — Liants hydrauliques. Dunod, 1942.
12. H. LE CHATELIER. — Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. *Thèse*, 1887 et 1904.
13. M. LEPINGLE. — Action de la chaleur sur les bétons et les liants hydrauliques. *Travaux*, n° 112, 1942, p. 269. (Circulaires séries F, n°s 4, 7 et 11 de l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics).
14. M. MEHMEL. — Fortschritt der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie, t. XXIII, fasc. 2, 1939.
15. E. RENGADE. — Les liants hydrauliques. *Extrait du Traité de Chimie minérale*, t. VII de PASCAL. Masson, 1932.
16. E. RENGADE. — Les échantillons normaux de ciments. *XV^e Congrès de Chimie industrielle*. Bruxelles, 1935.
17. E. RENGADE. — Quelques propriétés du ciment fondu. *Revue des Matériaux de Construction et de Travaux publics*, n° 335, 1937.
18. G. R. — La construction des ouvrages en béton aux températures extrêmes. *Travaux*, n° 91, 1941, p. 27.

ANNEXE

PLANCHE I.

TABLEAU I.

MÉTHODES	LIANTS	GACHEURS	MÉDIANES kg/cm ²	ÉCARTS MOYENS relatifs des 24 essais %	ÉCARTS MAXIMUM relatifs des 24 essais %	MOYENNE DES ÉCARTS maximum relatifs dans 1 gâchée %	MOYENNE DES ÉCARTS relatifs des médianes %
Malaxeur et girateur	Artificiel V	R	285	2,5	4,0	1,9	1,9
—	Artificiel B (a)	R	409	2,2	4,4	1,9	1,8
—	—	R	415	2,0	6,4	2,1	1,1
—	—	R	415	2,7	5,8	2,6	1,9
—	—	R	415	2,3	5,3	2,6	1,5
—	—	S	417	2,1	5,4	2,3	0,8
—	Artificiel B (b)	F	431	1,3	3,1	1,4	0,7
—	—	R	433	2,3	7,6	2,5	1,6
—	Laitier Trèfle (a)	R	119,5	3,6	8,2	2,2	3,3
—	—	R	119	3,5	8,6	2,7	3,0
—	Laitier Trèfle (b)	R	128	1,95	6,2	1,9	1,3
—	—	S	125	3,25	8,8	3,4	2,2
—	—	D	122	3,4	7,8	2,6	2,9
—	—	D	125	4,3	9,4	2,4	3,6
—	Fondu Lafarge	R	953	4,3	10,0	4,6	3,3
—	—	D	975	2,8	8,7	3,3	1,3
—	Chaux tambour	R	97,8	2,5	5,1	2,1	2,0
—	—	D	98,3	2,0	4,0	1,7	1,2
Tout à la main	Artificiel B	R	299	4,2	10,4	5,1	1,9
—	—	S	340	4,95	12,9	4,0	4,7
—	Laitier trèfle (a)	R	100	4,7	13,8	5,5	3,0
—	Laitier trèfle (b)	S	119	3,05	6,7	3,5	2,4
—	Fondu Lafarge	R	628	7,7	21,2	9,5	5,5
—	Chaux tambour	R	83,4	3,9	10,3	4,0	2,4
Malaxeur et main	Artificiel B	R	288	3,1	7,3	3,3	2,1
—	—	S	368	4,2	9,2	3,4	3,6
—	Laitier trèfle (a)	R	93,5	2,6	5,9	2,2	2,4
—	Laitier trèfle (b)	S	122	3,15	9,4	3,4	1,4
—	Fondu Lafarge	R	700	4,7	9,8	4,5	3,3
—	Chaux tambour	R	83,3	2,5	6,2	2,5	1,8
Main et girateur	Artificiel B	S	434	2,7	5,7	2,8	2,4
—	Laitier trèfle (b)	S	135	3,9	8,1	2,3	3,3

A. CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL FRANÇAIS (Livraison du 2 décembre 1938).

CHARGES DE RUPTURE EN KG/CM ² AUX TEMPÉRATURES DE :																			
(1) ESSAI	(2) MISE en eau après	(3)			(4)									(5)			(6)		
		0,5° C			18° C			18° C			18° C			45,5° C			69,5° C		
		g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane
24 h	sans				287,5	102		289	103		287	109							
					287,5	106	106	287	107	107	286,5	110	110						
					285	108		287	110,5		287,5	110							
16 h		285,5	60		287	103								289	200				
		298	61	61	287	106	106							286	202	202			
		285,5	65		289,5	113								287	204				
3 j	16 h	285	119		287	279								286,5	366		286	390	
		286	124	124	287,5	279	279							287,5	374	374	284	401	401
		287	125		286,5	288								288	390		288,5	416	
24 h		287,5	162		289,5	271		286	282		285,5	285		287	376		286,5	402	
		286	165	165	286,5	283	283	289	288	288	286,5	285	285	286,5	381	381	286,5	406	406
		285	171		285,5	294		286,5	289		286	288		287	390		286	416	
7 j	16 h	286	210											287	451				
		289	226	(226)										288,5	451	451			
		286	235	230										290,5	454				
24 h		290	277		287,5	397		287,5	(378)		287	401		288	473		286	513	
		286	284	284	287	399	399	288	401	(401)	288	407	407	290	476	476	287	518	518
		285,5	290		285	404		289	403	402	287	408		287	481		288,5	546	
3 j		286	343											288	459		285,5	489	
		287,5	347	347										286,5	474	474	286	502	502
		286,5	351											288,5	478		288	502	
28 j	24 h	285	460		288,5	581		289,5	578		287	563		286,5	552		287	606	
		288	473	473	286	594	594	287,5	593	593	287,5	584	584	288	597	597	288	614	614
		286,5	486		288	615		288	598		287	597		287	601		287	617	
3 j		288	478											289,5	639		286	628	
		287,5	491	491										290,5	640	640	287	631	631
		286	504											287	641		288,5	646	
7 j		286	505											288,5	612		288	623	
		287	505	505										287	617	617	287	642	642
		286	522											288	648		288	650	
45 j	24 h	286	528		287	623		288,5	636		288,5	621		288,5	590		289	602	
		289,5	533	533	288	652	652	288	648	648	289	628	628	288	652	652	287,5	640	640
		286	560		286,5	666		287	658		288	646		289,5	669		288,5	658	
3 j		286	(522)											288	658		287,5	600	
		286	532	(532)										287	680	680	288,5	616	616
		289	538	535										289	682		286	668	
7 j		284	529											286,5	683		289	646	
		288	542	542										290	686	686	288,5	688	688
		288	548											289,5	696		289	694	
28 j		286,5	594											289,5	640		287	652	
		285,5	612	612										288	652	652	287	676	676
		287	627											288	681		289	676	
90 j	24 h	286	600		285	628		287	716		288,5	676		289	641		287	692	
		287	613	613	286	652	652	287,5	725	725	287	688	688	290	674	674	286	711	711
		287	639		288	680		288	728		285,5	732		286,5	674		288,5	738	
3 j		286	583											288,5	662		286	696	
		288	604	604										288	668	668	287	702	702
		287,5	627											288,5	688		286,5	705	
7 j		286	593											288	700		287	748	
		286,5	620	620										287	713	713	286	750	750
		286	620											289	766		287	773	
28 j		287,5	666											289,5	684		288	742	
		288	681	681										287	722	722	286	753	753
		286	684											287	724		288	754	
45 j		286	668											288	(670)		287,5	698	
		288	669	669										289	726	(726)	286	706	706
		288	705											286	738	732	287	730	
766 médiane de 24 éprouvettes.																			
2 ans	24 h																		

B. CIMENT FONDU LAFARGE DU 22 DÉCEMBRE 1938.

CHARGES DE RUPTURE EN KG/CM ² AUX TEMPÉRATURES DE :																			
(1) ESSAI	(2) MISE en eau après	(3)			(4)									(5)			(6)		
		0,5° C			18° C			18° C			18° C			45,5° C			69,5° C		
		g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane
24 h	sans				299,5	846		300	842		300	(680) ¹							
					297,5	848	848	298,5	886	886	297	812	812						
					300,0	883		301,0	924		299,5	840	(826)						
3 j	16 h	301	754								296,5	803		301	854				
		296,5	828	828							298	824	824	297	890	890			
		300	842								300,5	857		299	898				
		299	861								297	900		297	797		296	388	
		298	881	881							298,5	912	912	300	808	808	295,5	388	388
7 j	16 h	299	888								298	932		299	860		300	410	
		299,5	848		299,5	843		301	896		296	912		299	864		302	388	
		296,5	849	849	297,5	870	870	298,5	916	916	298	940	940	297	866	866	296,5	396	396
		299,5	865		301	928		301	931		298,5	954		300	907		298,5	400	
		301	880											301	435				
28 j	16 h	297	936	936										298	484	484			
		301,5	980											300,5	494				
		297	892		297,5	928		299,5	904		299	932		299	512		297,5	373	
		299,5	912	912	298,5	972	972	300	960	960	296	940	940	296	540	540	299,5	386	386
		301	924		300	996		297	984		298	960		298	558		296	393	
45 j	16 h	300	908											297	662		296	348	
		298	940	940										296,5	713	713	297	349	349
		299	972											299,5	818		298	408	
		298	936		300	920		300	880		298	1 050		298	396		298	430	
		299	1 000	1 000	301,5	1 090	1 090	298,5	912	912	299	1 090	1 090	297,5	416	416	297,5	448	448
90 j	16 h	301	1 000		298	1 100		299	920		298	1 140		300	431		297	468	
		297	956											302	392		298,5	406	
		301	984	984										297	412	412	297	450	450
		301	1 060											299	431		298	456	
		298	860											299	352		297,5	396	
28 j	16 h	299	1 000	1 000										299,5	384	384	296	418	418
		299	1 090											299	392		297,5	426	
		301	1 025		298	1 015		297	884		299	1 010		299,5	380		298,5	399	
		298	1 030	1 030	299	1 095	1 095	301	1 017	1 017	296	1 040	1 040	299	458	458	300	452	452
		301	1 090		300	1 140		298	1 028		296,5	1 130		297	486		297	464	
45 j	16 h	299	1 050											298,5	381		297	399	
		300	1 100	1 100										297,5	407	407	298	450	450
		299	1 115											296,5	432		298	456	
		299,5	1 100											301,5	400		297	408	
		301,5	1 105	1 105										296	409	409	301	409	409
90 j	16 h	296,5	1 105											299	433		299	422	
		300	1 045											298	365		298,5	348	
		298	1 095	1 095										299	385	385	299	367	367
		299	1 140											300	401		290	386	
		300	1 050		299	1 020		297,5	1 030		296,5	1 010		298	436		298	454	
28 j	16 h	299,5	1 110	1 110	298	1 060	1 060	300	1 040	1 040	297	1 040	1 040	298	462	462	296	465	465
		298	1 120		299	1 070		297	1 090		298	1 060		301	465		299	472	
		301	1 090											300	420		299	430	
		299	1 140	1 140										298	466	466	298,5	476	476
		300,5	1 190											300	470		299	489	
45 j	16 h	300,5	1 080											299	413		299,5	419	
		300	1 130	1 130										298,5	444	444	297	438	438
		298	1 130											298,5	448		299,5	450	
		299	1 050											302	404		299,5	396	
		302	1 070	1 070										297	415	415	296	414	414
90 j	16 h	296	1 100											297,5	441		300	436	
		300	1 040											299	401		297,5	372	
		298	1 130	1 130										300,5	402	402	298,5	373	373
		300	1 160											298,5	418		299	400	
2 ans	24 h	livraison du 5 juin 1939 996 médiane de 21 éprouvettes.																	

(1) Cassure anormale.

C. CHAUX TAMBOUR POLIET ET CHAUSSON (Livraison du 29 décembre 1938).

CHARGE DE RUPTURE EN KG/CM ² AUX TEMPÉRATURES DE :																			
(1)	(2)	(3)			(4)									(5)			(6)		
ESSAI	MISE en eau après	0,5° C			18° C			18° C			18° C			45,5° C			69,5° C		
		g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane
24 h	sans				278	31,3		277	30,5		278	(28,7)							
					279,5	31,6	31,6	279	31,7	31,7	279	31,6	31,6						
					277,5	33,2		278	32,6		277	32,3							
16 h		279	22,7								278	26,6		276,5	42,9				
		275	24,1	24,1							276	28,4	28,4	279	45,3	45,3			
		279	24,7								278	29,4		277	46,2				
3 j	16 h	277,5	36,8								278	61,4		277	92,4		277	131	
		277	38,0	38,0							277	64,8	64,8	277	94	94	277	135	
		278	38,4								278,5	65,8		278	101		278,5	136	
24 h		278	43,6		280	63,9		278,5	62,8		279	61,6		278	94,4		278,5	122	
		279	43,9	43,9	276	65,1	65,1	276	64,0	64,0	279	65,0	65,0	277,5	96,8	96,8	277	125	
		276,5	46,0		277	65,5		280,5	64,8		277	67,6		278	98,4		277,5	127	
7 j	16 h	278,5	54,7											278,5	148				
		277,5	54,8	54,8										278,5	149	149			
		278,5	57,0											276	153				
24 h		278	58,8		278	89,4		279,5	96,0		276,5	96,5		281	154		276,5	189	
		276	59,0	59,0	277,5	90,6	90,6	278	96,8	96,8	279,5	97	97	275	155	155	279	192	
		277,5	60,8		277,5	93,1		276,5	96,8		279	107		278,5	158		278	206	
3 j		276	72,2											277,5	141		277	163	
		277	72,8	72,8										276	142	142	276,5	175	
		276	74,0											278,5	146		278,5	176	
28 j	24 h	276	102		279	158		277,5	166		279	175		279	246		278	276	
		277	105	105	279	161	161	279,5	168	168	277	178	178	276,5	250	250	280	278	
		279	107		276	171		277	176		279,5	178		277	254		278	284	
3 j		279	108											279,5	237		279	263	
		280	111	111										276,5	248	248	278,5	265	
		276,5	111											280	252		276,5	275	
7 j		278	(111)											279	232		279	247	
		278	118	118										277,5	240	240	277	259	
		276,5	126											277	246		278	263	
45 j	24 h	279,5	138		277,5	207		279	205		279	217		277,5	269		279	314	
		278	139	139	277,5	215	215	278	205	205	278	223	223	278,5	269	269	278	318	
		276,5	142		276,5	219		277,5	214		280	234		278	293		280	319	
3 j		279	136											278	274		276,5	300	
		276	138	138										277	279	279	279	313	
		277	141											277	282		276	320	
7 j		278,5	144											278,5	275		279	274	
		279,5	148	148										276	276	276	279,5	299	
		276,5	152											280,5	281		277,5	322	
28 j		278,5	184											279	259		279	238	
		276	185	185										276	260	260	278,5	255	
		279	200											278	270		279	269	
90 j	24 h	278	183		277	275		277	283		276	265		278,5	325		279	385	
		277	184	184	278,5	286	286	277,5	283	283	277	266	266	279	330	330	277,5	389	
		277,5	194		278	287		278	296		277	273		277	331		277	401	
3 j		278,5	184											278	330		278	375	
		278	186	186										277	333	333	276	383	
		277	187											277	342		278,5	393	
7 j		280	188											279,5	322		277	351	
		277	190	190										276	326	326	276	354	
		277	192											277	334		280	361	
28 j		279	227											278,5	326		278	305	
		275	228	228										276	335	335	279	321	
		278	228											279	336		277	335	
45 j		279	241											277	323		278,5	291	
		277	242	242										279	327	327	276	298	
		276,5	246											277	332		278	302	
2 ans	24 h	410 médiane de 24 éprouvettes.																	

D. LAITIER TRÈFLE CEMENTS FRANÇAIS (Livraison du 6 janvier 1939).

CHARGES DE RUPTURE EN KG/CM ² AUX TEMPÉRATURES DE :																			
(1) -ESSAIS	(2) MISE en eau après	(3)			(4)									(5)			(6)		
		0,5° C			18° C			18° C			18° C			45,5° C			69,5° C		
		g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane	g	kg/cm ²	mé- diane
24 h	sans				288	17,3		287	19,9		289	20,9							
					288	17,8	17,8	286,5	20,3	20,3	288,5	21,9	21,9						
					286	18,4		286	21,8		289	22,0							
3 j	16 h	288	7,2								289,5	18,9		287	53,6				
		285	7,4	7,4							285	19,3	19,3	285,5	56,7	56,7			
		286	7,6								287	21,5		289	58,3				
	24 h	287	19,5								288,5	57,4		285	231		286	364	
		286	21,2	21,2							286	59,3	59,3	286	236	236	285,5	368	368
		287	24,0								287,5	59,8		288	262		288	371	
7 j	16 h	286,5	28,9		285	58,0		285,5	63,8		283,5	56,2		285,5	229		286	300	
		288	30,0	30,0	288	58,2	58,2	288,5	63,8	63,8	285,5	59,6	59,6	287	243	243	286	323	323
		288	33,6		287	60,6		287,5	64,1		288	60,2		288	253		287	329	
	24 h	288	39,5											288	372				
		286	40,6	40,6										288	381	381			
		289	41,3											286	387				
28 j	16 h	285	49,6		287,5	112		287	114		289	119		289	359		289	363	
		287	50,2	50,2	287	120	120	287	116	116	287,5	121	121	285	382	382	287	378	378
		289	50,4		289	124		286	118		288,5	121		287,5	383		288	382	
	24 h	286	73,2											287	331		287	321	
		286,5	76,0	76,0										286	335	335	287	324	324
		288	81,8											289	358		286,5	336	
45 j	16 h	288,5	115		287,5			288	278		286	(272)		287,5	486		280,5	(400)	
		287	120	120	289	308	(308)	289	296	296	289	295	(295)	286	499	499	285	424	424
		288	133		287	314	311	287	308		286,5	298	297	287	519		288	440	(432)
	24 h	285	133											289	491		283,5	(356)	
		290	137	137										286	504	504	289,5	368	368
		288,5	150											288	509		289	403	(385)
90 j	16 h	286,5	171											287	507		287	422	
		287,5	175	175										285	517	517	287	436	436
		287	187											287	527		287	452	
	24 h	287	(140)		286	357		287,5	345		288	348		288,5	517		288	412	
		288	156	(156)	288	360	360	287	358	358	286	350	350	286	560	560	287	451	451
		286	161	159	286,5	360		288	366		288	367		288,5	560		289	452	
2 ans	16 h	288	164											289	516		280	(380)	
		286	168	168										287	521	521	286	406	(406)
		287,5	182											286	545		287	412	409
	24 h	288	196											289	574		289	448	
		286	200	200										286	575	575	286	463	463
		289	215											289	587		289	485	
2 ans	16 h	288	310											288	589		288	506	
		288	312	312										287	596	596	287	514	514
		287	324											287,5	601		289	524	
	24 h	287	223		285,5	447		286,5	434		287,5	464		287	546		289,5	462	
		286,5	232	232	284	458	458	286,5	455	455	289	468	468	287	563	563	287,5	486	486
		287,5	232		287	461		287	477		287	469		286	567		286,5	492	
2 ans	16 h	287	236											285,5	(516)		289	(404)	
		288	245	245										288,5	569	(569)	290	437	437
		286,5	254											286	588	579	287,5	441	(439)
	24 h	287	264											286	590		287	493	
		288	268	268										288	594	594	288	503	503
		288	271											287	596		289,5	514	
2 ans	16 h	284	348											287,5	638		(288)	587	
		289,5	358	358										284,5	650	650	290,5	590	590
		289,5	368											288	662		286	594	
	24 h	286	376											288	640		288	596	
		286	391	391										287	640	640	290	613	613
		287	393											286	680		287,5	636	
827 médiane de 24 éprouvettes.																			

327 médiane de 24 éprouvettes.

B. CIMENT FONDU LAFARGE (Livraison du 8 mars 1939).

ESSAIS	MISE en eau après	CHARGES DE RUPTURE EN KG/CM ² AUX TEMPÉRATURES DE :														
		18° C									70° C					
		SANS IMMERSION			EAU DE FLUIE			EAU DE CHAUX			EAU DE FLUIE			EAU DE CHAUX		
		g	kg/cm ²	médiane	g	kg/cm ²	médiane	g	kg/cm ²	médiane	g	kg/cm ²	médiane	g	kg/cm ²	médiane
5 h	sans	297 298,5 298	110 116 125	116												
8 h	sans	297 299 302	455 516 529	516												
	5 h				300 297 300,5	376 419 430	419	297,5 302 299,5	376 395 406	395	301 296 302	313 342 370	342	300 297 298	319 329 355	329
12 h	sans	298 299 299	559 610 639	610												
	5 h				301 298 298	645 686 715	686	302 301,5 300	642 653 669	653	298 297 300	393 401 407	401	299 297,5 299,5	388 392 403	392
	8 h										298 298,5	341 352	346	297 300 300	331 336 356	336
24 h	sans	299,5 298,5 299,5	713 734 745	734												
	5 h				300,5 301 297,5	838 926 936	926	299 297 300,5	763 797 825	797	296,5 300 299	413 413 467	413	298,5 301 300,5	403 409 428	409
	8 h										302,5 298 298,5	391 404 434	404	299 299,5 300	368 370 384	370
	12 h										297 301 299	350 352 393	352	300 297,5 300	322 333 350	333
7 j	5 h				297,5 296 300	896 (988) 1 020	(968)	295 299,5	776 840	(808)	297,5 297,5	432 474	(453)	296 299,5	393 422	(408)
	24 h				296 299,5	820 940	(880)	297 296	712 780	(746)	300,5 295 298	391 421 435	421	297 298 299	387 405 419	405
28 j	5 h				300 298 299	1 135 1 140 1 175	1 140	299,5 300 297,5	940 1 000 1 060	1 000	297,5 298 300	472 481 575	481	299 297 299	529 534 549	534
	24 h				300 300 297,5	1 050 1 080 1 100	1 080	297,5 299 298	956 960 1 035	960	302 296 299	428 451 494	451	299 300 299	431 448 470	448
	8 j										301 301 299	386 432 451	432	297,5 300 299	391 397 448	397

*NOTA. — Les essais à 7 j ne sont donnés qu'à titre indicatif; ces éprouvettes, les premières fabriquées, ont été démoulées à 3 h 30 mn d'âge pour un essai d'immersion à 4 h. Mais on a constaté que le durcissement était insuffisant pour permettre la manipulation des éprouvettes qui ont subi de ce fait une détérioration.

N° 123



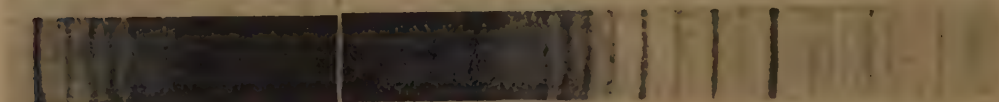
N° 132



N° 133



N° 148



N° 59



N° 182



N° 93



N° 124



N° 76



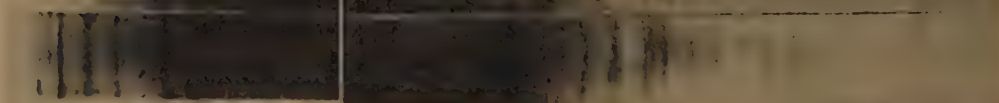
N° 136



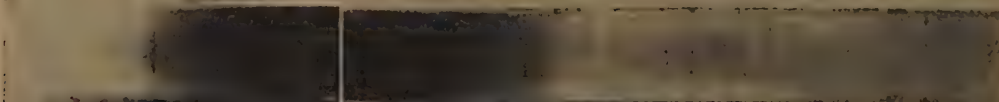
N° 92



N° 53



N° 100



N° 189



DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Les liants de remplacement.

Vu et approuvé :

Paris, le 25 Octobre 1945.

**Le Doyen de la Faculté des Sciences,
P. MONTEL.**

Vu

et Permis d'imprimer :

**Le Recteur de l'Académie
de Paris,**

S. CHARLÉTY.

IMPRIMERIE
ARRAULT ET C^{IE}
== TOURS ==